

Darvil Lucas Bianchet

Estudo preliminar para captação de água da chuva por meio de pavimentos permeáveis na cidade de Florianópolis/SC

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao programa de graduação
em Engenharia Civil da Universidade
Federal de Santa Catarina para a
obtenção do título de Engenheiro Civil.
Orientadora: Prof.^a Dr.^a Liseane
Padilha Thives

Florianópolis
2015

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Bianchet, Darvil Lucas

Estudo preliminar para captação de água da chuva por meio de pavimentos permeáveis na cidade de Florianópolis/SC / Darvil Lucas Bianchet ; orientadora, Liseane Padilha Thives - Florianópolis, SC, 2015.
114 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Controle de escoamento na fonte. 3. Captação de águas pluviais. 4. Pavimento permeável. I. Thives, Liseane Padilha. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Darvil Lucas Bianchet

**ESTUDO PRELIMINAR PARA CAPTAÇÃO DE ÁGUA DA
CHUVA POR MEIO DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS NA
CIDADE DE FLORIANÓPOLIS/SC**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Civil, e aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia Civil.

Florianópolis, 4 de julho de 2015.

Banca Examinadora:



Prof.^a Dr.^a Liseane Padilha Thives
Orientadora
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.^o Dr. Rafael Augusto dos Reis Higashi

Eng^o Moisés Eduardo Lima Lemos

“A maior necessidade do mundo é a de homens - homens que não se comprem nem se vendam; homens que no íntimo da alma sejam verdadeiros e honestos; homens que não temam chamar o pecado pelo seu nome exato; homens, cuja consciência seja tão fiel ao dever como a bússola o é ao polo; homens que permaneçam firmes pelo que é reto, ainda que caiam os céus.” Ellen G. White

Agradecimentos

A Professora Liseane Padilha Thives que me aceitou como orientando sem pensar duas vezes e confiou em meu trabalho desde o início. Que me incentivou nos momentos difíceis, sempre buscando aprimorar ao máximo este trabalho, fornecendo conhecimento e ideias, além do melhor suporte que se pode esperar de um orientador;

Aos Professores que passaram ao longo de toda a minha vida, principalmente os da faculdade de Engenharia Civil da UFSC, que certamente auxiliarão em minha vida profissional;

Ao meu amigo Anderson Pavei Battisti, que me acolheu como um irmão em Florianópolis, fazendo parte de grande parte das minhas vitórias;

Ao meu amigo Alexandre H. H. Grillo, que muito me ajudou durante toda a faculdade;

A todos os amigos adquiridos ao longo da faculdade, que a fizeram passar num piscar de olhos, sempre compartilhando bons momentos;

Aos estágios por onde passei que, cada qual na sua forma, me transmitiram conhecimentos que me ajudarão ao longo de toda a minha trajetória profissional e pessoal;

Ao Engenheiro Marcio R. do Nascimento, que me deu a oportunidade de trabalhar no laboratório de materiais e ampliar meus conhecimentos na área da Engenharia Civil, além de ser um ótimo chefe e amigo;

Ao meu amigo Roque, que muito me ensinou no laboratório de materiais, sempre tendo paciência e ajudando quando possível;

A MIMA Engenharia, por ter cedido o projeto do condomínio base, para que fosse possível ser analisada a viabilidade de implantação de pavimentos permeáveis na cidade de Florianópolis.

Ao Engenheiro Civil Erik Diogo de Amorim que não está mais entre nós e apesar do pouco tempo de convivência ter se mostrado um exemplo de pessoa e profissional;

Ao meu falecido Tio querido Darci Limberger, um ótimo educador de vida e de fé, que ensinou a mim e a todos que o cercavam a simplicidade da vida e a possibilidade da felicidade sempre, independente da situação;

Ao meu Nono Armando Bianchet e minha Nona Fiorentina, um casal batalhador que sempre buscou o melhor para toda a família;

A dona Darci, seu Carlos, Fabio e Karen, que me acolheram como um filho durante os 4 anos que passei em Curitiba.

Aos meus sobrinhos amados Kétlin, Isabeli, Vitor e Pedro, que são minha maior fonte de alegria;

Aos meus pais Darvil e Célia, que me permitiram chegar onde estou hoje, me encorajando a superar qualquer obstáculo da vida, sempre se mostrando exemplos de seres humanos;

As minhas irmãs Tatiane, Simone e Leila e aos meus irmãos Alexandre, Aurélio e Fábio, que são exemplos de família a serem seguidos;

E por fim a minha namorada Priscila, que no decorrer de todo este trabalho me ensinou a enfrentar as dificuldades e nunca desistir, além de me dar todo suporte necessário e entender o tempo que deixamos de passar juntos. A você meu amor, meu muitíssimo obrigado.

RESUMO

A falta de água potável no século XXI é uma realidade enfrentada por diversos países. Estudos da Organização das Nações Unidas (ONU, 2015) preveem que em 2030, a população global vai necessitar de 40% a mais de água. Porém, a tendência é de que a qualidade e a quantidade de água potável diminua o que implica na necessidade de formas alternativas de armazenamento deste líquido tão necessário. A adoção de pavimentos permeáveis como função de controle de escoamento na fonte e captação de águas pluviais é uma iniciativa que tende a gerar maior controle e planejamento na ocupação do solo, permitindo o desenvolvimento sustentável das cidades e minimizando os impactos decorrentes da urbanização. Desta forma, o presente trabalho descreve o pavimento permeável como um todo, abrangendo os materiais possíveis de utilização nesta forma de pavimentação bem como os tipos de pavimentos permeáveis e suas respectivas funções em relação ao controle de escoamento na fonte, armazenamento das águas pluviais e liberação destas para o lençol freático além da descrição metodológica para o dimensionamento mecânico e hidráulico destes pavimentos.

Palavras-chave: Controle de escoamento na fonte, pavimento permeável, captação de água pluvial.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|-----------|
| Figura 1 - Metodologia empregada no trabalho | 24 |
| Figura 2 - Estrutura dos pavimentos flexíveis | 28 |
| Figura 3 - Estrutura dos pavimentos rígidos..... | 29 |
| Figura 4 - Ilustração do funcionamento do pavimento drenante | 30 |
| Figura 5 - Detalhe Ilustrativo para a solução de pavimentação com blocos de concreto permeável com drenagem da água infiltrada por tubulação | 33 |
| Figura 6 - Detalhe Ilustrativo para a solução de pavimentação de concreto permeável de cimento Portland com drenagem da água infiltrada por tubulação | 34 |
| Figura 7 - Ilustração dos 3 tipos de vazios possíveis de presença numa mistura porosa..... | 35 |
| Figura 8 - Módulos utilizados na geração de dados de escoamento superficial..... | 36 |
| Figura 9 - Exemplo das 4 formas estruturais dos pavimentos permeáveis..... | 41 |
| Figura 10 - Ilustração dos tipos de pavimento permeáveis segundo Schueler (1987) | 42 |
| Figura 11 - Ilustração dos tipos de pavimento permeáveis de acordo com Corsini (2014) | 43 |
| Figura 12 - Pavimentos com reservatório em nível ou inclinados... | 44 |
| Figura 13 - Análise de viabilidade de implantação de pavimentação permeável..... | 45 |
| Figura 14 - Ilustração de Material Alveolar | 47 |
| Figura 15 - Estacionamento preenchido por grama – Loja Iguaçu Máquinas (representante da John Deere maquinários agrícolas)..... | 48 |
| Figura 16 - Blocos vazados de concreto poroso | 49 |
| Figura 17 - Exemplos de Aplicação de Geocélulas plásticas | 50 |
| Figura 18 - Blocos intertravados de concreto poroso e blocos vazados de concreto poroso | 51 |
| Figura 19 - Concreto poroso e concreto asfáltico poroso..... | 52 |

| | |
|---|----|
| Figura 20 - Ilustração da secção de dois corpos de prova, sendo um com graduação densa e outro com graduação aberta..... | 54 |
| Figura 21 - Real secção de dois corpos de prova, sendo um com graduação densa e outro com graduação aberta. | 55 |
| Figura 22 - Exemplos de curvas granulométricas de diferentes misturas asfálticas a quente..... | 56 |
| Figura 23 - Altura total do pavimento e índices totalizadores dessa altura | 62 |
| Figura 24 - Risco de ocorrência de enchente | 64 |
| Figura 25 - Visualização do efeito da colmatação..... | 69 |
| Figura 26 - Localização do terreno com o uso do <i>google maps</i> | 72 |
| Figura 27 - Planta baixa do condomínio a ser implantado o pavimento permeável..... | 72 |
| Figura 28 - Detalhe de uma quadra do condomínio de implantação do pavimento permeável..... | 73 |
| Figura 29 - Fluxograma de análise de viabilidade de implantação de pavimentação permeável no condomínio deste projeto | 74 |
| Figura 30 - Sequência de atividades | 75 |
| Figura 31 - Tipos de pavimentos escolhidos | 77 |
| Figura 32- Configuração final do pavimento | 82 |
| Figura 33 - Risco de ocorrência de enchente no projeto em questão | 84 |
| Figura 34 - Perfil final do pavimento permeável..... | 91 |
| Figura 35 - Curvas de nível do terreno | 92 |
| Figura 36 - Imagem de satélite (<i>Google Earth 3D</i>)..... | 93 |
| Figura 37 - Dreno profundo perfurado..... | 94 |
| Figura 38 - Sentido de escoamento da água por gravidade..... | 95 |
| Figura 39 - Tabela de preços da CASAN..... | 99 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 1 - Coeficientes de Escoamentos por diferentes Superfícies | 36 |
| Tabela 2 - Coeficientes de permeabilidade dos componentes de BCP | 38 |
| Tabela 3 - Coeficientes de permeabilidade dos componentes de CPA | 38 |
| Tabela 4 - Comparativo entre superfícies | 53 |
| Tabela 5 - Faixas Granulométricas e requisitos para concreto asfáltico (DNIT 031/2004-ES) | 57 |
| Tabela 6 - Faixas Granulométricas e requisitos de dosagem da camada porosa de atrito (DNER-ES 386/99) | 57 |
| Tabela 7 - Dados de entrada das medidas de controle na fonte | 59 |
| Tabela 8 - Espessura mínima do revestimento | 61 |
| Tabela 9 - Relação entre finalidade da obra e Tempo de retorno | 65 |
| Tabela 10 - Classificação das vias e parâmetros de tráfego | 79 |
| Tabela 11- Coeficientes (K) de equivalência estrutural | 81 |
| Tabela 12 - Parâmetros das relações IDF existentes empregadas | 86 |
| Tabela 13 - Densidade dos grãos ensaiados por Virgiliis (2009) | 88 |
| Tabela 14 - Porosidade das camadas compactadas ensaiadas por Virgiliis (2009) | 88 |
| Tabela 15 - Resumo geral das médias mensais de precipitação dos anos de 1981 a 2010 (série completa) | 98 |
| Tabela 16 - Influência da profundidade de britas no acréscimo do custo dos pavimentos asfálticos permeáveis | 101 |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 19 |
| 1.1. Objetivos | 21 |
| 1.1.1. Objetivo geral..... | 21 |
| 1.1.2. Objetivos específicos | 22 |
| 1.2. Justificativa | 22 |
| 1.3. Metodologia | 23 |
| 1.4. Estrutura do trabalho | 24 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 27 |
| 2.1. Pavimento Convencional | 27 |
| 2.2. Pavimento Permeável – História e Aplicações..... | 30 |
| 2.3. Termos aplicados aos pavimentos permeáveis..... | 31 |
| 2.4. Características dos Pavimentos Permeáveis..... | 32 |
| 2.5. Funcionamento dos pavimentos permeáveis..... | 33 |
| 2.6. Vazios comunicantes | 34 |
| 2.7. Escoamento superficial | 35 |
| 2.8. Atributos e deficiências dos pavimentos permeáveis | 38 |
| 2.9. Tipos de Pavimentos Permeáveis | 40 |
| 2.10. Viabilidade na implantação de pavimentos permeáveis..... | 45 |
| 2.11. Materiais Utilizados Para a Execução dos Pavimentos Permeáveis..... | 46 |
| 2.12. Agregados Componentes das Camadas de Base dos Pavimentos Permeáveis..... | 46 |
| 2.13. Gramíneas, Blocos Vazados de Concreto Poroso e Geocélulas Plásticas..... | 48 |
| 2.14. Blocos Intertravados de Concreto Poroso | 50 |

| | | |
|--------|--|----|
| 2.15. | Concreto Permeável e Concreto Asfáltico Permeável .. | 51 |
| 2.16. | Comparativo entre os tipos de material para a camada superficial | 53 |
| 2.17. | Mistura asfáltica densa X mistura asfáltica aberta | 54 |
| 2.18. | Uso de ligantes modificados por polímeros | 58 |
| 2.19. | Dimensionamento do Pavimento Permeável..... | 58 |
| 2.20. | Dimensionamento mecânico | 60 |
| 2.21. | Dimensionamento hidráulico | 63 |
| 2.22. | Manutenção dos pavimentos permeáveis..... | 67 |
| 2.23. | Colmatação | 68 |
| 2.24. | Drenagem Urbana..... | 69 |
| 3. | MATERIAIS E MÉTODO | 71 |
| 3.1. | Materiais | 71 |
| 3.1.1. | Projeto base | 71 |
| 3.1.2. | Local | 71 |
| 3.1.3. | Planta de implantação | 72 |
| 3.2. | Método..... | 73 |
| 3.2.1. | Análise de viabilidade..... | 73 |
| 4. | RESULTADOS | 77 |
| 4.1. | Concepção do Pavimento..... | 77 |
| 4.1.1. | Tipo de Pavimento a ser implantado | 77 |
| 4.1.2. | Materiais componentes do pavimento | 78 |
| 4.2. | Dimensionamento Mecânico do Pavimento | 78 |
| 4.2.1. | Tráfego e Índice de Suporte Califórnia (CBR)..... | 78 |
| 4.2.2. | Espessura total do pavimento (Hm)..... | 79 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 4.2.3. | Espessura mínima do revestimento (R) | 80 |
| 4.2.4. | Espessura mínima das camadas granulares | 80 |
| 4.3. | Dimensionamento Hidráulico do Pavimento | 82 |
| 4.3.1. | Período de Retorno (T) e tempo de concentração (t)... .. | 83 |
| 4.3.2. | Intensidade pluviométrica | 85 |
| 4.3.3. | Porosidade (n) | 87 |
| 4.3.4. | Profundidade do reservatório | 89 |
| 4.4. | Avaliação do dimensionamento mecânico X dimensionamento hidráulico..... | 90 |
| 4.5. | Perfil final do pavimento | 90 |
| 4.6. | Drenagem das águas pluviais | 91 |
| 4.6.1. | Introdução | 91 |
| 4.6.2. | Áreas contribuintes | 92 |
| 4.6.3. | Características do Terreno..... | 92 |
| 4.6.4. | Considerações para a concepção do projeto de drenagem. | 93 |
| 4.6.5. | Dimensionamento do reservatório principal | 95 |
| 4.7. | Redistribuição das águas pluviais captadas no reservatório principal..... | 96 |
| 4.8. | Roteiro para análise de custos | 96 |
| 4.9. | Alimentação do Roteiro para análise de custos | 98 |
| 4.9.1. | Cálculo do armazenamento mensal | 98 |
| 4.9.2. | Cálculo da economia mensal..... | 99 |
| 4.9.3. | Custo do pavimento convencional..... | 100 |
| 4.9.4. | Custo do pavimento permeável | 100 |
| 4.9.5. | Estimativa de tempo de retorno do investimento | 101 |

| | |
|---|-----|
| 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E Recomendações | 103 |
| 5.1. Considerações Finais | 103 |
| 5.2. Recomendações para trabalhos futuros | 104 |
| Referências..... | 107 |
| Anexos | 111 |

1. INTRODUÇÃO

A falta de água potável no século XXI é uma realidade enfrentada por diversos países. Estudos da Organização das Nações Unidas (ONU, 2015) preveem que, em 2030, a população global vai necessitar de 40% a mais de água. Porém, a tendência é de que a qualidade e a quantidade de água potável diminua o que implica na necessidade de formas alternativas de armazenamento deste líquido tão necessário.

O Brasil é um país provido de muitos mananciais, porém há um custo para se obter água potável. Apesar de haver este custo, existe muito desperdício de água potável ao longo da rede canalizada.

No Brasil, especificamente a cidade de São Paulo (SP), desde novembro de 2014 vive a maior estiagem dos últimos 45 anos (FERREIRA, 2015). A população ficou sem água potável por semanas e sem perspectiva de uma fonte alternativa de abastecimento. Portanto, planejar reservas de água e aproveitar de forma racional os recursos hídricos é de suma importância.

A seca em São Paulo no último período chuvoso, entre outubro e março, foi uma das mais graves já registradas. Segundo dados do IAG (Instituto de Astronomia e Geofísica) da USP (Universidade de São Paulo), esta foi a temporada com menos chuvas desde 1969. O ano de 2014 foi o 13º ano mais seco desde que as medições começaram, em 1934, e também a pior desde a criação do Sistema Cantareira, em 1973.

Por outro lado, devido a fatores climáticos, chuvas advindas após longos períodos de estiagem vêm em forma de tempestade, trazendo consigo um grande volume de água, ocasionando enchentes. Estas são devidas, em grande parte, pela impermeabilização excessiva do solo, o que vem a dificultar e até impedir a absorção da água da chuva, que por sua vez escoar em grande quantidade para as galerias pluviais e rios. Ainda, muitas galerias pluviais por vezes, não comportam o volume excessivo de água ou podem estar entupidas por sujeiras e detritos. Aliado a isso, o crescimento desordenado e ocupação inadequada do solo tendem a gerar grandes áreas impermeáveis nas cidades.

A excessiva impermeabilização do solo gera ainda, um impacto negativo às cidades, resultando em enchentes, alagamentos e incapacidade de abastecimento dos lençóis freáticos. Para tanto, deve-se utilizar de dispositivos que cresçam a taxa de infiltração da água no solo e que retardem esse escoamento.

Partindo desta premissa, na cidade de São Paulo foi desenvolvido o “Projeto de Lei nº 12, de 2012” (ANEXO 1) que buscou estabelecer

novas diretrizes sobre como estruturar o uso do solo em novas construções. Se aprovado, esse projeto tornaria obrigatória a adoção de pavimentação ecológica em, por exemplo, vias internas de condomínios públicos, ciclovias, passeios de logradouros públicos, etc. Uma das razões apresentadas como justificativa para oficialização deste Projeto, é a de que “a utilização dos pavimentos permeáveis em áreas urbanas visa reduzir a vazão drenada superficialmente, melhorar a qualidade da água e contribuir para o aumento da recarga de água subterrânea”. De acordo com o artigo 2º deste Projeto de Lei, é entendido como pavimentação ecológica “todo tipo de piso permeável ou semipermeável que permita o escoamento de água e a recarga do aquífero”.

As reformas de pavimentação que preenchem estes requisitos são executadas das seguintes maneiras:

- 1) blocos de concreto de tipo intertravado rejuntado com materiais permeáveis;
- 2) blocos vazados preenchidos com grama;
- 3) asfalto poroso;
- 4) concreto poroso que permita a passagem de água.

Existem outras diretrizes a serem seguidas como, por exemplo, os incisos 2 e 3 do artigo 2º que estabelecem que o terreno a ser pavimentado deve ser previamente preparado a fim de garantir a capacidade de infiltração das águas pluviais e que uma vez aprovado o projeto é terminantemente proibida qualquer impermeabilização adicional de superfície.

Este projeto demonstra que a importância na contenção de enchentes e a escassez de água nos aquíferos estão ligadas diretamente com a falta d'água nas residências.

No Brasil, não só a cidade de São Paulo é afetada pelas chuvas. Este fato pode ser evidenciado em várias regiões do Brasil e até do Globo. Em Santa Catarina, por exemplo, as cidades de Itajaí, Tubarão, Blumenau e Florianópolis vêm sofrendo com enchentes há décadas. Neste cenário, é destacada a enchente de 2008, que foi devida a fortes chuvas iniciadas na madrugada de 22 de novembro deste ano e que veio a deixar 14 cidades em estado de calamidade pública e outras 63 em estado de emergência, atingindo 1,5 milhões de catarinenses e deixando 135 mortos.

Particularmente, em Florianópolis foram evidenciados outros problemas além de grandes áreas impermeabilizadas. Em 2014, a região do Norte da Ilha ficou oito dias sem abastecimento de água em meados do final de dezembro devido ao fato da população neste local praticamente dobrar no verão (Prefeitura de Florianópolis, 2015).

Neste contexto, há mais uma aplicação para o pavimento permeável, a de captação e armazenamento de águas pluviais, comprodos em vários estudos já realizados, por exemplo, o estudo realizado em 1999 na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS; 1999).

Porém, o emprego deste tipo de pavimento é bem mais abrangente. Segundo Daywater (2003) pode também ser aplicado em vias de grande fluxo, obtendo-se como vantagens menor geração de ruído dos veículos e redução do splash das chuvas, diminuindo-se assim os problemas de aquaplanagem.

Portanto, o estudo deste tipo de pavimento (permeável) é de suma importância, e pode ser uma alternativa viável para a situação que se encontram as grandes cidades atualmente, tendo em vista que é uma das soluções para alguns dos problemas que as assolam.

1.2 Objetivos

1.1.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho de conclusão de curso é realizar um projeto preliminar para implantação de pavimento permeável em um condomínio residencial na cidade de Florianópolis, com posterior captação e armazenamento das águas pluviais.

1.1.2. Objetivos específicos

- Determinar qual o melhor pavimento permeável a ser implantado no referido condomínio;
- Dimensionar a estrutura permeável escolhida, tanto mecanicamente como hidraulicamente;
- Apresentar um *layout* do local a ser implantado o novo sistema de pavimentação;
- Realizar um esboço do projeto de drenagem, abrangendo a coleta, armazenamento e distribuição das águas pluviais;
- Determinar a quantidade de água possível de ser coletada e ainda, em quanto tempo a economia com essa coleta tornará a execução do sistema permeável viável em comparação com o convencional.

1.3 Justificativa

No Brasil há poucos estudos e baixo índice de utilização de pavimentos permeáveis. Foram feitos estudos experimentais e teóricos para determinação das taxas de infiltração dos vários tipos de pavimento permeável nos estados de São Paulo (USP 2005), de Minas Gerais e no Rio Grande do Sul, sendo que Porto Alegre foi a cidade pioneira nestas pesquisas. Em 1999, no instituto de pesquisas hidráulicas (IHP) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) iniciaram-se as pesquisas com o uso de simuladores de chuva para estimar o *runoff* – escoamento superficial.

Os processos de urbanização alteram o comportamento do escoamento superficial, principalmente devido à impermeabilização da superfície, o que produz maiores picos e vazões (Tucci, 2002).

Portanto, devido ao fato de os pavimentos permeáveis serem possíveis de aplicação a quaisquer áreas com grande declive, ruas impermeabilizadas, loteamentos de qualquer porte, sistemas de drenagem e manejo de águas pluviais, projetos passíveis de certificação por órgãos ambientais ou selos de certificação, e projetos que tenham

que reduzir as taxas de vazão de saída do empreendimento, os pavimentos permeáveis serão nosso objeto de estudo.

Tendo isso em vista, o foco principal deste trabalho é avaliar a implantação de pavimentos permeáveis em um condomínio em construção na cidade de Florianópolis, no bairro dos Ingleses situado norte da Ilha. O local em questão trata-se de um dos bairros que mais sofre com a falta d'água, principalmente no verão. Além disso, é uma área atualmente intacta no caráter ambiental, que virá a ser amplamente impermeabilizada gerando aumento nos picos de vazão.

1.4 Metodologia

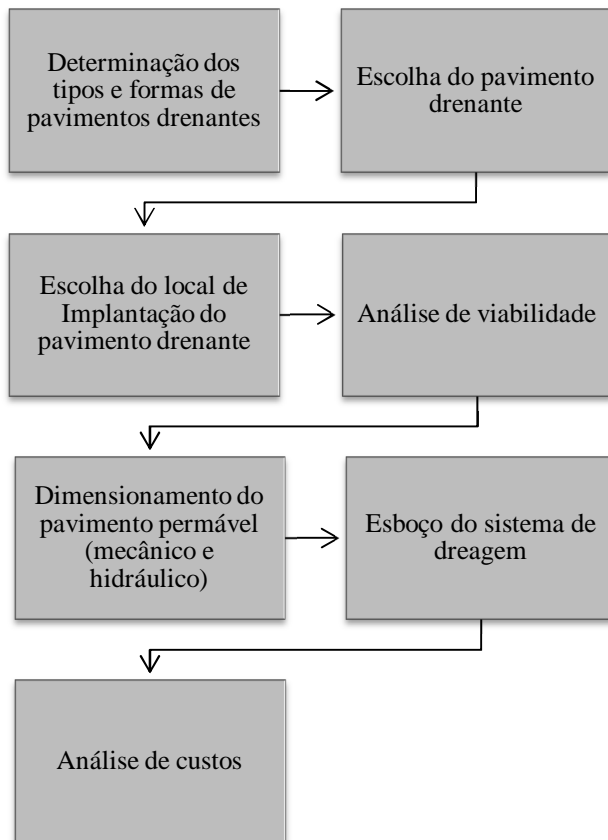
Neste trabalho será discorrido sobre os pavimentos impermeáveis, semipermeáveis e totalmente permeáveis além dos diversos materiais que os compõe, como por exemplo, concreto permeável, concreto asfáltico permeável, blocos intertravados de concreto permeável, blocos vazados preenchidos com grama, etc. A partir destas análises serão definidas as melhores e mais eficientes formas de pavimentação permeável para aplicação nas áreas pavimentadas do condomínio de estudo.

Posteriormente, com base nos dados de projeto, o pavimento será dimensionado tanto mecanicamente quanto hidraulicamente e a partir disso será elaborado e implantado ficticiamente um sistema de drenagem para as águas pluviais que ligará os pontos de captação a um reservatório principal e, deste reservatório, até os destinos finais, as residências.

Depois de avaliado o dimensionamento do pavimento e o sistema de drenagem, será realizada uma análise de custos a fim de determinar a partir de quanto tempo o sistema se torna economicamente viável. Ou seja, quando a economia de água superar o que for gasto a mais com o sistema permeável em comparação com o sistema convencional (não permeável), tendo como parâmetro a pluviosidade média anual na região de implantação.

A Figura 1 representa o fluxograma da metodologia deste trabalho.

Figura 1 - Metodologia empregada no trabalho



Fonte: O Autor (2015)

1.5 Estrutura do trabalho

Este trabalho está estruturado em 5 capítulos.

Capítulo 1 - Introdução

Neste capítulo é apresentada uma visão geral sobre os pavimentos permeáveis, mostrando o que são e algumas de suas utilidades, bem

como situá-los no cenário brasileiro e mundial. Também são apresentados os objetivos a serem atingidos com o trabalho em questão (objetivos gerais e específicos), como serão atingidos (metodologia) e o porquê de se atingir tais objetivos (justificativa).

Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica

Neste capítulo será feita uma breve introdução sobre o que são pavimentos e como são classificados para só então ser tratado do assunto deste trabalho, os pavimentos permeáveis. Depois de um breve histórico sobre como se desenvolveu a utilização dos pavimentos permeáveis pelo mundo, eles serão classificados em função de seu funcionamento, eficiência de seus poros, permeabilidade, tipos de revestimento e reservatório. Também será discorrido sobre os roteiros de dimensionamento mecânico e hidráulico dos pavimentos permeáveis.

Capítulo 3 - Materiais e Método

Neste capítulo será caracterizado o condomínio que servirá como base para o estudo de implantação de pavimento permeável e será analisada a viabilidade de implantação desta forma de pavimentação neste condomínio.

Capítulo 4 – Resultados

Neste capítulo será concebido o pavimento (materiais e tamanhos de cada camada componente do pavimento), de forma a atender tanto os critérios mecânicos quanto hidráulicos. Também será elaborado um sistema de drenagem de forma a atender os objetivos específicos deste trabalho e posteriormente será realizada uma sucinta análise de custos.

Capítulo 5 - Conclusão e recomendações para trabalhos futuros

Neste capítulo será feita uma análise geral dos resultados obtidos e serão sugeridos temas para a continuidade do tema deste trabalho.

Ainda são apresentadas referências utilizadas na realização deste trabalho e os anexos à este trabalho (Projeto de Lei nº 12, de 2012).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Pavimento Convencional

Pavimento é uma estrutura desenvolvida sobre um terreno provido de terraplenagem que é destinada a receber, resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pela fadiga. Também, melhorar as condições de rolamento no sentido de gerar comodidade e segurança, além de suportar as forças horizontais nela atuantes, possibilitando a superfície de rolamento durar por mais tempo. (Moraes, 2009).

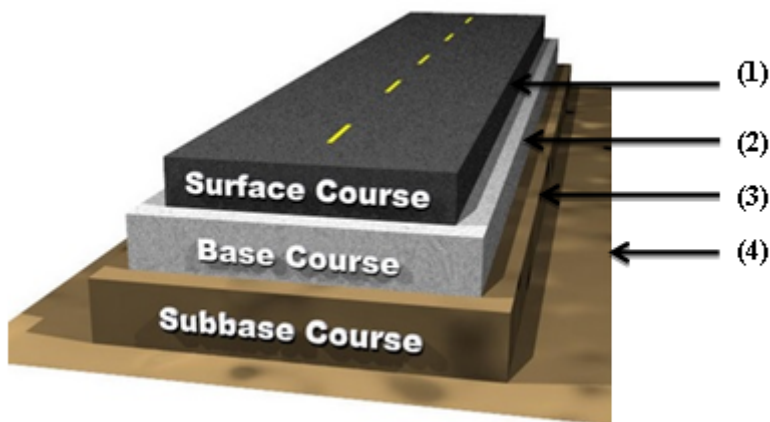
De acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) (Brasil; 2006), o pavimento é uma estrutura constituída por um sistema de camadas providas de determinadas espessuras, sobre um infraestrutura ou terreno de fundação, o qual é designado como subleito.

O DNIT ainda classifica os pavimentos em três grupos distintos (Brasil; 2006):

- 1) Pavimento Flexível: Pavimento cujas camadas, ao serem solicitadas por carregamentos aplicados sofrem deformação elástica significativa, de modo a distribuir a carga em parcelas equivalentes entre as camadas do referido pavimento. Um exemplo típico de pavimento flexível pode ser constituído por uma base de brita graduada, macadame ou solo pedregulhoso, revestido por uma camada asfáltica (Figura 2).
- 2) Pavimento Semi-rígido: Pavimento que se caracteriza por ser constituído de uma base cimentada por aglutinantes com propriedades cimentícias (solo cimento¹, por exemplo), revestida por uma camada asfáltica.
- 3) Pavimento Rígido: Pavimento cujo revestimento possui elevada rigidez se comparado às camadas inferiores, responsável por absorver praticamente todas as tensões geradas por carregamentos aplicados. Como exemplo, citam-se pavimentos com revestimento de concreto de cimento Portland (Figura 3).

¹ Solo-cimento: mistura devidamente compactada de solo, cimento e água.

Figura 2 - Estrutura dos pavimentos flexíveis



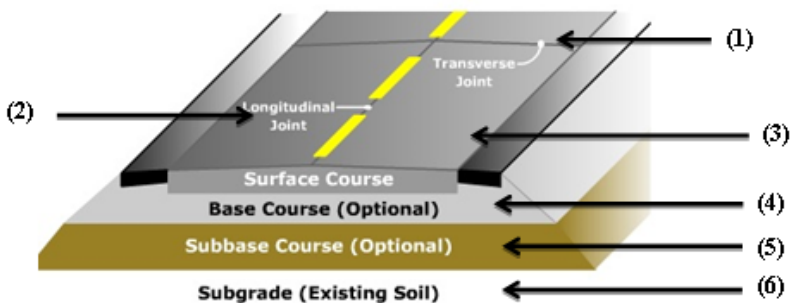
Fonte: adaptado de *Pavement Interactive* (2009)

De acordo com o *Pavement Interactive* (2009), as camadas do pavimento mostrado na Figura 2 podem ser definidas como:

- (1) Camada de Superfície ou de rolamento (*Surface Course*): É a camada que fica em contato direto com os esforços ocasionados pelo tráfego e contém os materiais de mais alta qualidade de toda a estrutura do pavimento. Esta camada provê o pavimento com atrito, suavidade, controle de ruído e resistência à choques além de impedir a entrada de água nas camadas de base, sub-base e subleito;
- (2) Camada de base (*Base Course*): É a camada imediatamente inferior à camada de rolamento. É esta camada quem faz a distribuição de tensões geradas na camada superficial pelo tráfego de veículos;
- (3) Camada de sub-base (*Sub-base course*): Esta camada se encontra entre a camada de base e o subleito (4), que é a camada de solo compactado existente) e tem como função principal a de suporte estrutural. Além disso, atua no sentido de minimizar a entrada de finos do subleito para a estrutura do pavimento. É uma camada constituída, geralmente, de materiais de qualidade inferior aos

constituintes da camada de base (2). Em alguns casos sua necessidade é descartada, como por exemplo, quando o subleito é provido de material de boa qualidade.

Figura 3 - Estrutura dos pavimentos rígidos



Fonte: adaptado de *Pavement Interactive* (2009)

Legenda Figura 3:

(1): Juntas transversais; (2): Juntas longitudinais; (3): Camada de rolamento; (4): Camada de base (opcional); (5): Camada de sub-base (opcional); (6): Subleito (Solo existente).

Tanto o pavimento rígido quanto o flexível são projetados de tal forma a impedir a entrada da água em sua estrutura, conduzindo, geralmente, essa água para drenos laterais. Em contrapartida, existem os pavimentos permeáveis, porosos ou drenantes. São pavimentos projetados de tal forma, que aliado a outros fatores, ao se empregar uma determinada faixa granulométrica de agregados, produzem-se vazios, que por sua vez drenarão a água para dentro da estrutura do pavimento, como ilustra a Figura 4. A existência destes vazios confere aos pavimentos permeáveis a característica de ajudar a reduzir o escoamento de águas pluviais e por sua vez os impactos que estas águas causariam às cidades.

Figura 4 - Ilustração do funcionamento do pavimento drenante



Fonte: *Pavement Interactive* (2009)

2.2 Pavimento Permeável – História e Aplicações

Segundo FERGUSON (2005), pavimentos permeáveis são definidos como aqueles que possuem espaços livres na sua estrutura por onde a água pode atravessar. Ou ainda, “aquele que possui porosidade e permeabilidade significativamente elevada de maneira a influenciar a hidrologia e causando algum efeito positivo ao meio ambiente” (Virgiliis 2009).

A França foi o país pioneiro na aplicação de pavimentos com estruturas porosas no final da década de 40. Porém, como os ligantes asfálticos não eram bem estudados até então, a estrutura rompia-se pela baixa adesividade ligante-agregado, não conferindo capacidade de carregamento ao revestimento permeável (Azzout et. al., 1994). De acordo com Tomaz (2009), nos anos de 1970, no *Franklin Institute* na Filadélfia, Estados Unidos da América (EUA), o tema se desenvolveu e então surgiu o conceito de pavimento permeável. A partir de então este pavimento passou a ser mais utilizado.

ACIOLLI (2005) atribuiu o aumento do uso desta forma de pavimentação ao fato de que no período do pós-guerra os sistemas de drenagem urbanos estavam sobrecarregados por consequência do

repentino aumento populacional e consequente aumento das superfícies impermeáveis. O pavimento permeável, por sua vez, que tem como característica principal auxiliar na drenagem da água foi uma boa alternativa para a época. Soma-se a isto o fato de que esse auxílio na drenagem da água traz mais segurança e conforto ao dirigir por não se formarem poças, diminuindo os efeitos da aquaplanagem e o *spray* em dias chuvosos. Ainda, seu uso reduz a emissão de ruídos sonoros se comparado ao pavimento convencional, diminuindo a poluição sonora nos grandes centros.

Outro país que fez grande uso desta técnica foi o Japão. A cidade de Yokohama, por exemplo, que possuía 4,4 milhões de habitantes em 1994, recebeu pavimentos permeáveis nos locais que tinham tendência a inundação (Watanabe, 1995).

Atualmente, mais países tem controlado na fonte o escoamento superficial, a fim de solucionar problemas de drenagem urbana. Um exemplo é a Austrália, que tem se utilizado do *Urban Water Resources Centre* (UWRC) para incorporar a pavimentação permeável a estacionamentos, terrenos industriais e loteamentos urbanos (UWRC 2004).

No Brasil, Porto Alegre foi a cidade pioneira nestas pesquisas, que começaram em 1999 por Araújo et. al. (2000), no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IHP) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) com o uso de simuladores de chuva para estimar o *runoff* - escoamento superficial.

2.3 Termos aplicados aos pavimentos permeáveis

A seguir é apresentado o Quadro 1, desenvolvido por Virgiliis (2009) a fim de explicar e definir alguns dos componentes dos pavimentos permeáveis, de modo a facilitar o entendimento do assunto Pavimentação Permeável.

Quadro 1 - Terminologia aplicada a Pavimentos Permeáveis

| Terminologia | Definição |
|------------------------|--|
| Camada de Base | Camada colocada abaixo da superfície de revestimento para aumenta a espessura do pavimento. Pode ser simplesmente chamada de Base. |
| Camada | Espaço ocupado entre dois tipos de materiais na estrutura do pavimento. |
| Camada Filtrante | Qualquer camada entre outras ou entre o pavimento e o subleito que detenha a migração de partículas para os vazios da camada subjacente. |
| Geomembrana | Tecido impermeável geralmente plástico ou Polietileno de Alta Densidade (PEAD) utilizada em sistemas impermeabilizantes. |
| Geotextil | Manta não-tecida de filamentos de polipropileno que possibilita a livre passagem das águas de infiltração para o meio drenante. |
| Pavimento | Qualquer tratamento ou cobertura na superfície que suporte qualquer tipo de tráfego. |
| Sobrecamada | Camada aplicada sobre qualquer tipo de pavimento preexistente |
| Estrutura do Pavimento | Combinação de camadas de materiais colocadas sobre o subleito que possibilitam o suporte mecânico do pavimento. |
| Reservatório | Qualquer parte do pavimento com capacidade de estocagem o condutividade de água. O reservatório pode ser sobreposto ou combinado com outras camadas do pavimento. Também chamado de Reservatório de Base, Camada Drenante ou Colchão drenante. |
| Sub-base | Camada colocada abaixo da Base a fim de aumentar a espessura do pavimento. |
| Subleito | Solo natural ou reforçado abaixo da estrutura do pavimento, responsável pela absorção em última instância dos carregamentos. |
| Revestimento | Camada do pavimento que recebe diretamente a carga de tráfego. |

Fonte: Virgiliis (2009)

2.4 Características dos Pavimentos Permeáveis

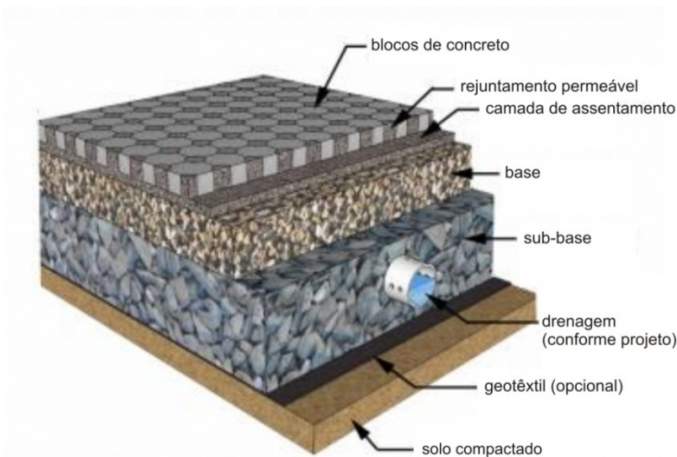
De acordo com Marchioni e Silva (2011), ao se comparar um pavimento permeável com um pavimento convencional, o primeiro fato que pode ser evidenciado é a nítida diferença, quando chovendo, no escoamento de água superficial. Enquanto no convencional haverá, de acordo com a demanda pluvial, considerável escoamento superficial, no permeável será notório um baixíssimo escoamento superficial devido ao fato de este possibilitar que a água penetre em sua estrutura. Áreas com pavimentação permeável bem dimensionada podem apresentar taxas de infiltração superiores a áreas com vegetação natural, dependendo do nível de compactação deste solo. Essa característica se deve ao funcionamento hidráulico dos pavimentos permeáveis.

2.5 Funcionamento dos pavimentos permeáveis

Conforme Azzout *et al.* (1994), o funcionamento do pavimento permeável é constituído pelas seguintes etapas, como mostrado nas Figuras 5 e 6:

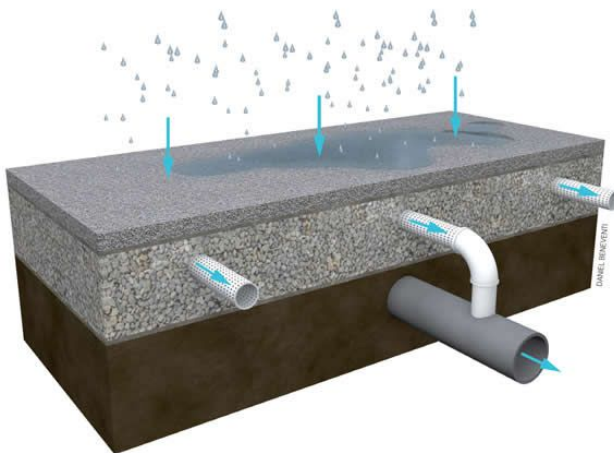
- Rápido ingresso da água pluvial na estrutura do pavimento, que na Figura 5 se caracteriza como blocos de concreto e na Figura 6 como pavimento de concreto de cimento Portland;
- Armazenagem da água nos vazios interiores ao pavimento (base e/ou sub-base);
- Lenta saída da água do pavimento que pode ser por infiltração no solo, liberação para a rede de drenagem ou então pela combinação dos dois (drenagem conforme projeto).

Figura 5 - Detalhe Ilustrativo para a solução de pavimentação com blocos de concreto permeável com drenagem da água infiltrada por tubulação



Fonte: Rhinopisos – Instruções de colocação (2015)

Figura 6 - Detalhe Ilustrativo para a solução de pavimentação de concreto permeável de cimento Portland com drenagem da água infiltrada por tubulação



Fonte: Mazzonetto (2011)

2.6 Vazios comunicantes

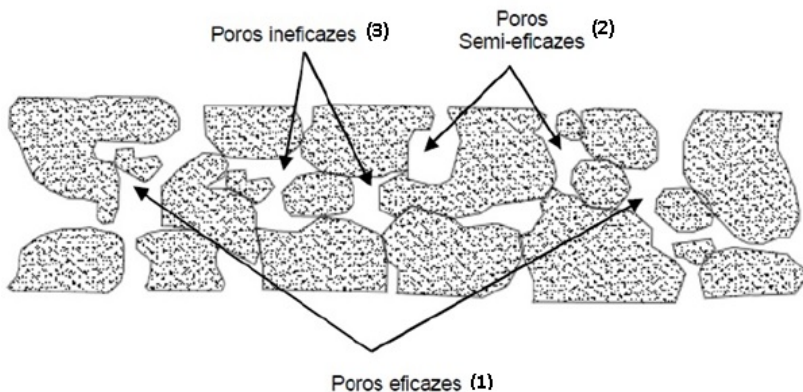
Existe uma grande diferença entre pavimentos porosos e pavimentos permeáveis. Os pavimentos permeáveis são necessariamente porosos, porém os porosos não são necessariamente permeáveis. Os pavimentos porosos podem conter porosos, porém não permitir a entrada da água devido à falta de vazios comunicantes (poros eficazes). Portanto, para o pavimento ser considerado permeável este tem que possuir vazios conectados (Pinto, 2011).

De acordo com Oliveira (2003), o Projeto Diretriz da Tecnologia de Pavimentação Drenante (Associação das Rodovias do Japão, 1996), classifica os poros das misturas em 3 diferentes categorias que podem ser visualizadas na Figura 7. As categorias são:

- (1) Poros eficazes: são aqueles que contribuem tanto para passagem quanto para o armazenamento da água;

- (2) Poros semi-eficazes: aqueles que apenas permitem o armazenamento da água, não contribuindo para a passagem dela;
- (3) Poros ineficazes: aqueles que não contribuem nem para a passagem nem para o armazenamento da água.

Figura 7 - Ilustração dos 3 tipos de vazios possíveis de presença numa mistura porosa



Fonte: Nascimento (2012)

Portanto, quanto maior for a percentagem de vazios comunicantes (vazios eficazes), maior será a permeabilidade da mistura, permitindo-se assim a passagem da água pela estrutura do pavimento.

2.7 Escoamento superficial

Araújo *et. al.* (2000) geraram dados de escoamento superficial de diferentes tipos de superfícies resultantes de estudos realizados em locais onde foram simuladas chuvas sobre módulos de 1m² de solo compactado, paralelepípedos, blocos de concreto, concreto, de blocos vazados e de concreto permeável. A ilustração das superfícies estudadas e a tabela gerada com os dados obtidos através deste estudo podem ser visualizadas na Figura 8 e na Tabela 1, respectivamente.

Figura 8 - Módulos utilizados na geração de dados de escoamento superficial



Fonte: Araújo *et. al.* (2000)

Tabela 1 - Coeficientes de Escoamentos por diferentes Superfícies

| Revestimento | Chuva Total (mm) | Escoamento Total (mm) | Coeficiente de Escoamento |
|---------------------------|------------------|-----------------------|---------------------------|
| Solo Compactado | 18,66 | 12,32 | 0,66 |
| Paralelepípedos | 18,33 | 10,99 | 0,6 |
| Blocos de Concreto | 19,33 | 15 | 0,78 |
| Concreto | 18,33 | 17,45 | 0,95 |
| Blocos Vazados | 18,33 | 0,5 | 0,03 |
| Concreto Permeável | 20 | 0,01 | 0,005 |

Fonte: Araújo (1999)

O Coeficiente de Escoamento, ou *runoff*, é definido como a relação entre o volume total escoado (água que não infiltra na

superfície) pelo volume total precipitado (ARAÚJO; 1999), como mostra a Equação (1):

$$R = \frac{E_t}{Ch_t} \quad (1):$$

Onde:

R – *Runoff*

Et – Escoamento total (mm)

Ch_t – Chuva total (mm)

Além do coeficiente de escoamento, pode-se determinar o coeficiente de permeabilidade do pavimento. A permeabilidade das camadas de revestimento é responsável pela percolação de água da chuva no pavimento poroso (Pinto, 2011).

Pinto (2011) realizou ensaios em 10 corpos de prova e com um permeâmetro de carga constante e auxílio da Lei de regime de escoamento proposta por Darcy, determinou o coeficiente de permeabilidade (K) do CPA (concreto asfáltico poroso). O resultado encontrado foi $K = 0,16 \text{ cm/s}$. A autora também apresenta dados dos coeficientes de permeabilidade dos componentes dos pavimentos permeáveis de bloco de concreto poroso (BCP) e de concreto poroso asfáltico (CPA) desenvolvidos por Cedergen (1987), como mostrado nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 - Coeficientes de permeabilidade dos componentes de BCP

| Material | e (m) | K (cm/s) |
|-----------------------|----------|-----------------------|
| BCP | 0,06 | 0,09 |
| Areia grossa | 0,04 | 0,10 a 1 |
| Geotêxtil | | 0,40 |
| BGS – faixa B (DERSA) | 0,10 | 0,01 a 0,04 |
| Macadame hidráulico | 0,15 | 7 |
| Pó de pedra | 0,05 | 10^{-1} a 10^{-2} |

Fonte: Pinto (2011 apud Cedergen, 1987)

Tabela 3 - Coeficientes de permeabilidade dos componentes de CPA

| Material | e (m) | K (cm/s) |
|---------------------|----------|-----------------------|
| CPA | 0,05 | 0,16 |
| Macadame betuminoso | 0,05 | 7 |
| Macadame hidráulico | 0,25 | 7 |
| Pó de pedra | 0,05 | 10^{-1} a 10^{-2} |

Fonte: Pinto (2011 apud Cedergen, 1987)

2.8 Atributos e deficiências dos pavimentos permeáveis

Este tipo de sistema de drenagem pode ser considerado sustentável, por gerar um controle do fluxo de água, evitando assim, que

o sistema de drenagem urbana fique saturado além de promover uma melhoria na qualidade da água pluvial, podendo esta ser destinada a usos sustentáveis (Marchioni; Silva, 2011). Isto foi comprovado por Colandini (1999), que avaliou um pavimento permeável com estrutura de reserva implantado para a drenagem de uma área residencial em Rezé, na região de Nantes, França. Foi observado que a maior parte dos poluentes, como sólidos em suspensão, chumbo, cádmio e zinco, ficou retida na seção porosa do pavimento. Ainda, na seção inferior, foi instalada uma manta geotêxtil, que conferiu ao solo imediatamente inferior ao pavimento concentrações de chumbo, cádmio, zinco e cobre parecidas com as encontradas em amostras de solos naturais da região do referido estudo.

Além disso, pode-se afirmar que os pavimentos permeáveis possuem as seguintes vantagens (SUZUKI; AZEVEDO; KABBACH, 2013):

- A infiltração da água no pavimento reduz o volume de água na rede de drenagem, amenizando os riscos de inundações no final dos sistemas de drenagem;
- Podem ser utilizados em lugares em locais sem rede de drenagem;
- Promovem o controle do escoamento superficial na fonte, reduzindo os impactos hidrológicos da urbanização;
- Permitem economias com futuros gastos em ampliação da rede de drenagem para comportar escoamentos superficiais provindos de novas áreas impermeabilizadas, uma vez que aliviam a rede de drenagem;
- Quando a qualidade da água escoada superficialmente não for poluída a ponto de comprometer o lençol subterrâneo, esta forma de pavimentação pode aumentar a recarga do aquífero;
- Melhoramento da qualidade da água por remoção de poluentes;
- Diminuição da necessidade de meio-fios e canais de drenagem;
- Diminuição de derrapagens e dissipação de ruídos, melhorando a segurança e o conforto nas vias;
- É uma forma de drenagem que não ocupa espaços extras, integrando-se completamente à obra.

Entretanto, seu uso pode ser restrito. Por exemplo, em regiões frias pode haver congelamento da água, o que vêm a entupir os poros.

Em regiões com grandes taxas de erosão, devido ao vento, também pode haver entupimento dos poros por grande acúmulo de sedimentos na superfície do pavimento. Em áreas com o nível da água elevado seu uso também não é indicado. Além disso, Suzuki; Azevedo; Kabbach (2013) consideram como desvantagens específicas aos pavimentos permeáveis:

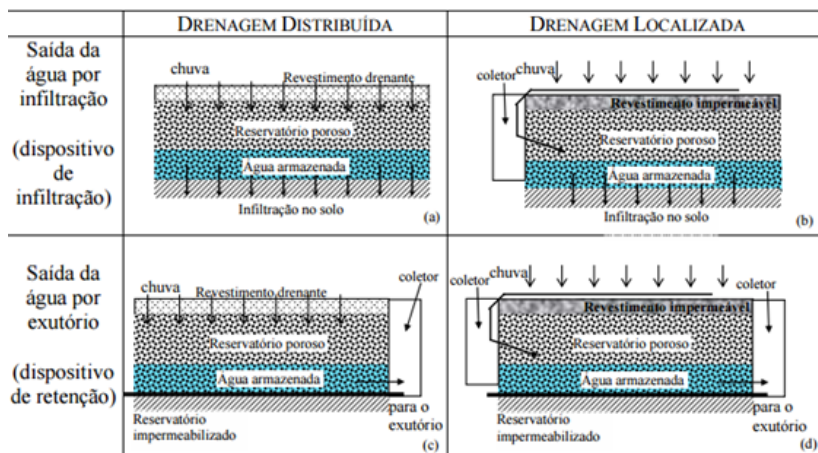
- O fato de haver carência de conhecimento na área, o que gera imperícia na aplicação desta tecnologia, fazendo com que não se atinjam os objetivos desejados;
- A grande tendência à obstrução dos poros do pavimento seja devido à má instalação ou conservação;
- O alto risco de ineficiência do sistema devido à má construção ou colmatação;
- E por fim, risco de contaminação do aquífero, a depender da situação do solo.

2.9 Tipos de Pavimentos Permeáveis

De acordo com Azzout et al. (1994), os pavimentos permeáveis podem ser caracterizados de quatro formas distintas, como ilustra a Figura 9:

- (a) Revestidos com material permeável e possuir função de infiltração;
- (b) Revestidos com material impermeável e apresentar a função de infiltração e armazenamento;
- (c) Revestidos com material permeável e ter a função de armazenamento sendo o fundo do reservatório impermeabilizado e havendo posterior captação da água pluvial ou devolução para a rede de drenagem;
- (d) Revestido com material impermeável e ter função de armazenamento, também com o fundo do reservatório impermeabilizado e havendo posterior captação da água pluvial ou devolução para a rede de drenagem.

Figura 9 - Exemplo das 4 formas estruturais dos pavimentos permeáveis



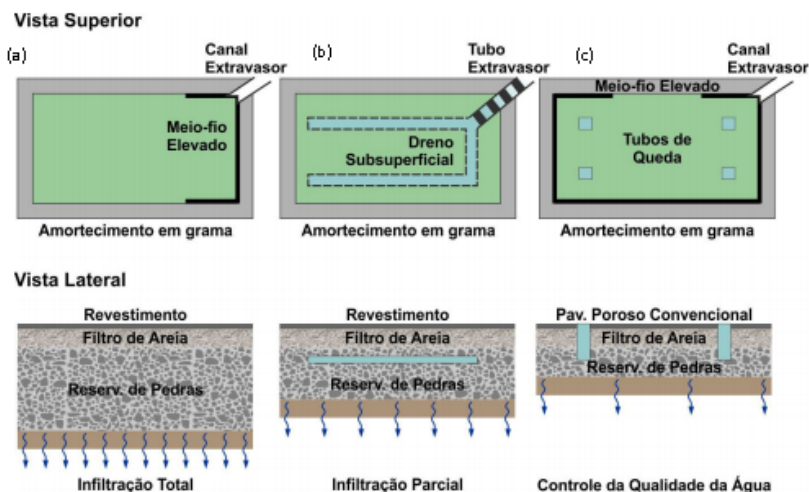
Fonte: Azzout et al. (1994)

Dependendo da capacidade de infiltração do solo e da forma de armazenagem da água pelo reservatório, segundo Schueler (1987), são três as caracterizações possíveis para os pavimentos permeáveis, ilustradas pela Figura 10:

- (a) Infiltração total: aplicável quando o solo possuir uma boa capacidade de infiltração. Assim, o reservatório de pedras deve ter dimensão determinada para absorver o volume total de escoamento de uma chuva de projeto menos o volume infiltrado durante a chuva.
- (b) Infiltração parcial: aplicável quando o solo não possui uma boa capacidade de infiltração. Este tipo conta com o auxílio de um sistema de drenagem subterrâneo, que por sua vez é munido de tubos perfurados localizados logo acima do reservatório de pedras, a fim de coletar toda a água que este reservatório não seria capaz de conter e direcioná-la a uma saída central;
- (c) Infiltração para controle da qualidade da água: aplicável para coletar apenas o *first flush* do escoamento, ou seja, apenas o início da chuva, onde se concentra a maior parte

dos poluentes. A água em excesso não é tratada pelo sistema, sendo conduzida por drenos até um coletor de águas pluviais.

Figura 10 - Ilustração dos tipos de pavimento permeáveis segundo Schueler (1987)

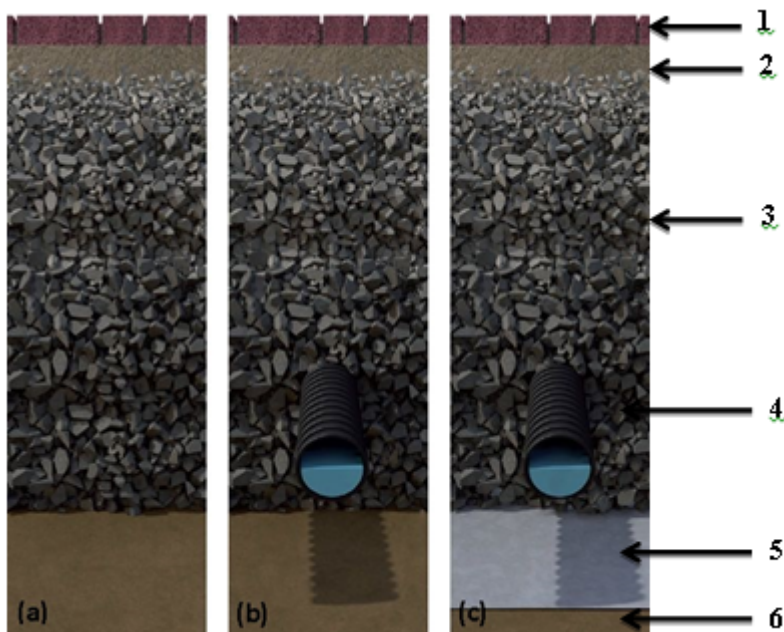


Fonte: adaptado de Pinto (2011 apud Schueler, 1987)

Corsini (2014) demonstrou praticamente as mesmas três caracterizações que Schueler (1987), porém em um sistema revestido com peças intertravadas de concreto poroso que promovem a infiltração da água, ilustradas na Figura 11.

- Infiltração Total:** toda água da chuva é direcionada para o subleito (não há tubulação para drenagem);
- Infiltração Parcial:** são instalados tubos de drenagem como complemento;
- Sem Infiltração:** onde um tubo de drenagem e uma manta impermeável direcionam a água para um sistema de drenagem auxiliar.

Figura 11 - Ilustração dos tipos de pavimento permeáveis de acordo com Corsini (2014)



Revista Pinni, edição 37 – Março de 2014

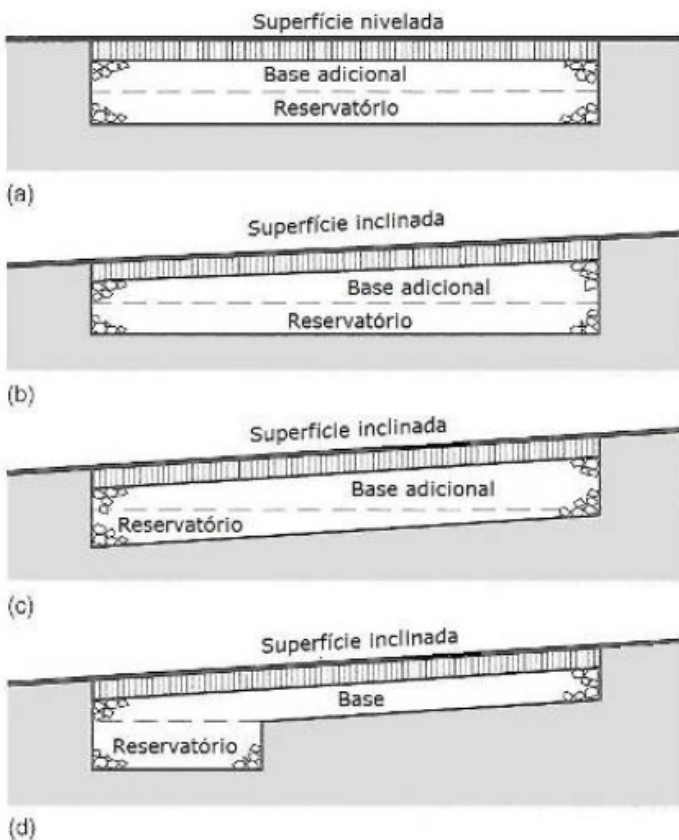
Legenda - 1: Pavimento intertravado de blocos de concreto permeável; 2: camada de assentamento; 3: base/sub-base; 4: Drenagem (conforme projeto); 5: Manta Impermeável; 6: Solo Compactado.

Os reservatórios dos pavimentos permeáveis, a depender da inclinação do terreno, podem ter configurações de modo a compensar essa inclinação e aumentar o volume de armazenamento, explica Virgiliis (2009). A Figura 11 detalha como isso se dá na prática, onde:

- (a) Se a superfície for nivelada haverá uma camada horizontal atuando como reservatório;

- (b) Se a superfície for inclinada e necessita-se de um reservatório nivelado, é necessária a execução de uma camada de base inclinada;
- (c) Se a superfície for inclinada e o reservatório também, perde-se volume de armazenamento, o que implica em (d);
- (d) A fim de compensar a perda de volume pela inclinação, executa-se o reservatório no lado para onde a água se dirigirá devido à inclinação da base.

Figura 12 - Pavimentos com reservatório em nível ou inclinados

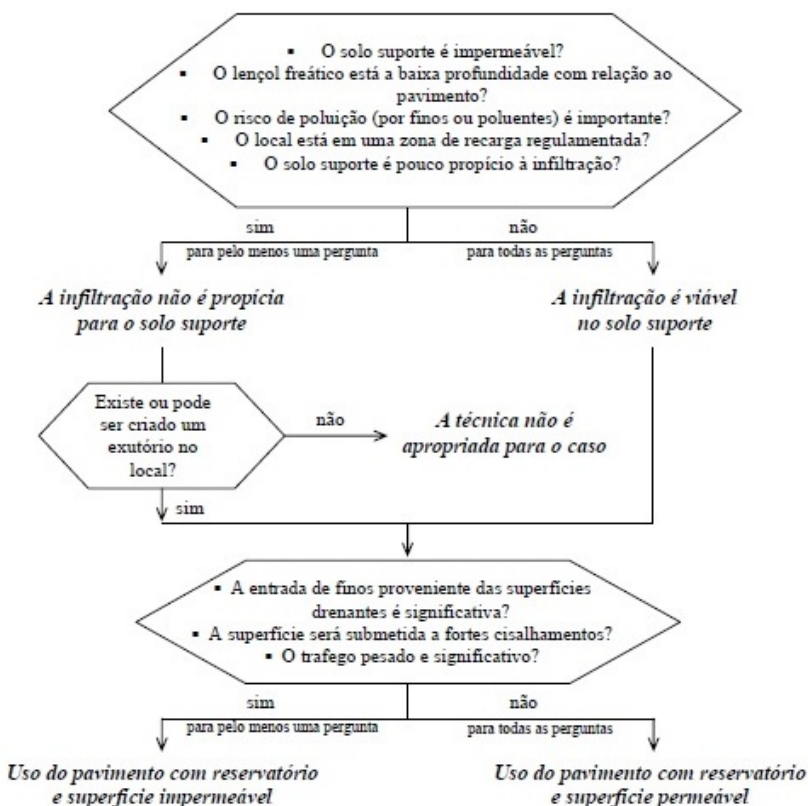


Fonte: Ferguson (2005)

2.10 Viabilidade na implantação de pavimentos permeáveis

Para determinar a viabilidade da utilização da pavimentação permeável e ainda, se haverá infiltração no solo de suporte e se a camada superficial será permeável, Azzout *et. al.* (1994) desenvolveu uma metodologia mostrada na Figura 13.

Figura 13 - Análise de viabilidade de implantação de pavimentação permeável



Fonte: Acioli (2005) (Adaptado de Azzout *et. al.*, 1994)

A metodologia consiste de um “jogo de perguntas e respostas”, onde a depender das respostas fornecidas ao fluxograma, este fluxograma direcionará o usuário do sistema primeiramente a definir se a técnica de pavimentação permeável é apropriada ou não. Caso positivo, segue-se o mesmo raciocínio até ser definido se será feito o uso do pavimento com reservatório e superfície impermeável ou então o uso do pavimento com reservatório e superfície permeável.

2.11 Materiais Utilizados Para a Execução dos Pavimentos Permeáveis

Serão consideradas como relevantes a este trabalho algumas famílias de materiais para pavimentos permeáveis, previamente classificados por Ferguson (2005), como os agregados, concreto poroso, concreto asfáltico poroso, blocos vazados e blocos intertravados de concreto poroso. Além destes, também será tratado sobre as geocélulas plásticas (Virgiliis ; 2009) e os materiais alveolares (Acioli; 2005).

2.12 Agregados Componentes das Camadas de Base dos Pavimentos Permeáveis

De acordo com Virgiliis (2009), qualquer material fragmentado, tais como pedregulho, pedra britada, cascalho, RDC (resíduo de construção civil), material reciclado de blocos de concreto, dentre outros, pode ser considerado agregado para pavimento permeável.

Os agregados constituem a camada base ou reservatório. Segundo Knapton (2002), o material mais comumente utilizado como agregado é a brita, que deve possuir diâmetro superior a 10 mm e não conter grandes quantidades de finos (menos de 3% de material com tamanho inferior a 2 mm e menos de 1% de material com tamanho inferior a 0,5mm), além de possuir resistência que suporte às solicitações às quais será submetido e dureza suficiente para suportar o atrito e impedir que se rompa, fazendo com que não haja redução de permeabilidade do material.

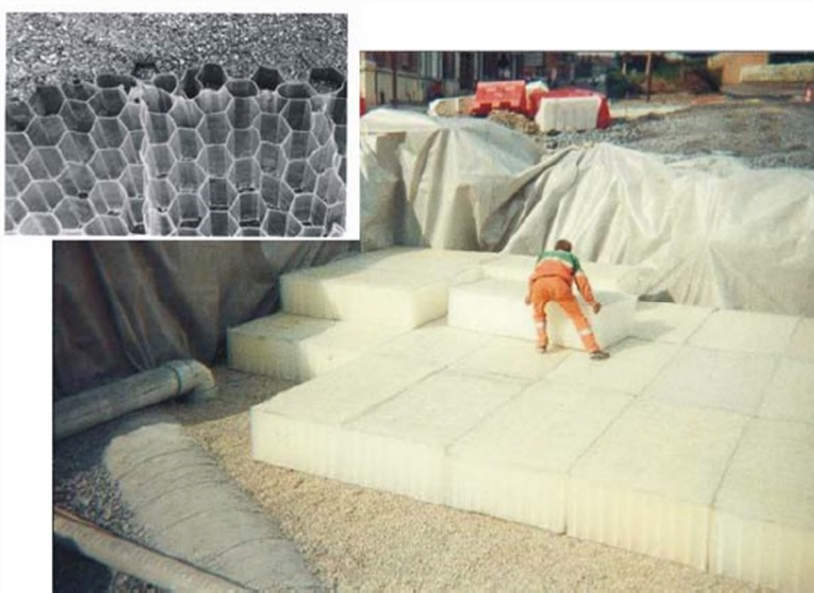
De acordo com KNAPTON (2002) esta camada do pavimento permeável possui duas principais funções:

- 1) Transmitir as solicitações aplicadas na camada de revestimento para o solo de suporte ou subleito;

- 2) Armazenar a água de forma provisória até sua completa infiltração no solo ou liberação para a rede de drenagem ou então a combinação destas duas funções.

A fim de se obter maior capacidade de armazenamento de água no interior do pavimento, Acioli (2005) citou em sua tese “Estudo Experimental de Pavimentos Permeáveis para o Controle do Escoamento Superficial na Fonte” os materiais alveolares em plástico que, segundo ela, são utilizados com o intuito de aumentar a capacidade de estocagem do reservatório sem a necessidade de se aumentar a espessura da camada. Estes materiais possuem porosidade acima de 90% e são exemplificados na Figura 14. Porém, de acordo com Azzout (1994), apesar de ser um material leve, o que diminui a carga sobre o solo, possui um custo elevado e não resiste aos raios ultravioletas, o que dificulta sua estocagem na obra.

Figura 14 - Ilustração de Material Alveolar



Fonte: Acioli (2005)

2.13 Gramíneas, Blocos Vazados de Concreto Poroso e Geocélulas Plásticas

Superfícies preenchidas apenas por grama (Figura 15) podem suportar tráfego de pedestres e de veículos leves. Por esta razão são geralmente utilizados em áreas como passeios e estacionamentos que sejam pouco utilizados. Quando compactados por excesso de tráfego este tipo de revestimento perde parte de sua permeabilidade. Neste caso é indicado aliar a pavimentação com gramíneas às geocélulas plásticas ou os blocos vazados de concreto poroso, podendo assim o pavimento suportar maiores cargas.

Figura 15 - Estacionamento preenchido por grama – Loja Iguaçu Máquinas (representante da John Deere maquinários agrícolas)



Fonte: Iguaçu Máquinas (2015) – representante oficial da John Deere

Os blocos intertravados vazados de concreto poroso são muito semelhantes aos blocos intertravados de concreto poroso, com a diferença de que os primeiros possuem aberturas que podem ser preenchidas por cascalho, areia ou grama (UDFDC, 2002), como mostra Figura 16.

De acordo com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) 9780/87 e 9781/87, para que os blocos vazados de concreto poroso possuam boa resistência à compressão, devem ser executados com concreto de resistência característica de no mínimo 25 MPa. Conforme com Virgiliis (2009), estes blocos devem ser firmemente unidos e confinados por bordas de concreto. Após executado, é um pavimento que apresenta excelente porosidade e condutividade hidráulica.

Figura 16 - Blocos vazados de concreto poroso



Fonte: Revista Pinni, edição - abril de 2013

As geocélulas (vide Figura 17) são feitas de polietileno e alta densidade (PEAD) e não precisam necessariamente ser aliadas apenas à gramíneas. Podem ser preenchidas por brita, areia, concreto ou qualquer outro solo, a depender de sua destinação (Virgiliis; 2009).

Figura 17 - Exemplos de Aplicação de Geocélulas plásticas



Fontes: (a): Alibaba produtos (2015); (b): Geofoco (2015); (c): AECweb (2015); (d): NTC (2015).

2.14 Blocos Intertravados de Concreto Poroso

De acordo com Virgiliis (2009) os blocos intertravados de concreto poroso apresentam relativa durabilidade e resistência, o que lhes confere vida útil longa e, portanto, economia levando-se em consideração seu custo-benefício além de possibilitarem a tráfegabilidade dos mais variados tipos. São geralmente assentados sobre camadas de areia, o que atribui ao pavimento permeabilidade e porosidade. Após seu assentamento, este pavimento deve ser confinado por bordas rígidas como sarjetas ou vigotas de concreto, a fim de impedir que se soltem.

Figura 18 - Blocos intertravados de concreto poroso e blocos vazados de concreto poroso



Fonte: Revista Prisma, artigo “pavimento permeável contra precipitações” (2015)

2.15 Concreto Permeável e Concreto Asfáltico Permeável

Segundo Urbonas e Stahare (1993), o concreto permeável, como apresentado na Figura 19(a), e o concreto asfáltico permeável - Figura 19(b) - são executados de forma semelhante aos pavimentos convencionais. A principal diferença quando da execução dos permeáveis em relação ao convencional está na remoção dos agregados finos (areia, pó de pedra, materiais passantes na peneira #200, etc.), permitindo ao pavimento porosidade suficiente a fim de possibilitar a entrada da água. Aliado à retirada de finos da mistura está o uso de agregados do mesmo tamanho. Virgiliis (2009) acrescenta que esta

composição ajuda na formação de vazios interiores à estrutura que não poderão ser preenchidos tendo em vista que não haverá finos.

De acordo com Fergunson (2005), o concreto permeável é muito semelhante ao concreto de cimento Portland, à exceção do tamanho dos agregados, que no concreto poroso devem ser de gradação uniforme.

O uso de concreto permeável é indicado para áreas com baixo volume de tráfego (passeios, estacionamentos residenciais), áreas com médio volume de tráfego (estacionamentos comerciais e ruas residenciais) e, a depender de seu dimensionamento, pode ser aplicado em áreas que receberão carregamentos de tráfego pesado. Porém há gastos com manutenção e limpeza, pois há sempre a possibilidade de colmatagem (Virgiliis; 2009).

O concreto asfáltico poroso é uma variação do concreto asfáltico convencional em termos de granulometria, com a característica principal de ser permeável e ao mesmo tempo vulnerável ao ligante betuminoso nele utilizado. Isto pode causar colmatagem no pavimento, quando executado de forma a não haver boa ligação entre ligante e agregado ou o ligante for muito fluido. Ao ocorrer alguma destas falhas, o ligante pode fluir pelos vazios e vir a segregar a partícula da superfície. Assim, países da Europa e os Estados Unidos têm seus departamentos de estradas e rodagem tentando possibilitar maior vida útil aos pavimentos de concreto asfáltico poroso, estabilizando o ligante betuminoso (Virgiliis; 2009).

Figura 19 - Concreto poroso e concreto asfáltico poroso



(a)



(b)

Fontes: (a) Pavimentação Asfáltica, formação básica para engenheiros, terceira edição, página 166; (b) Rhino Pisos (2015);

2.16 Comparativo entre os tipos de material para a camada superficial

Azzout et al. (1994) e Fach et. al. (2002) realizaram um comparativo entre os diversos aspectos de alguns dos pavimentos permeáveis (blocos vazados, asfalto poroso e concreto poroso) e de pavimento impermeável, como apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Comparativo entre superfícies

| Material Critérios | Blocos Vazados | Asfalto poroso | Concreto poroso | Revestimento impermeável |
|------------------------------|--|--|--|-----------------------------|
| Tipo de uso* | Praças Estacionamentos Vias de pedestres Calçadas | Todos os usos, desde que com estrutura reforçada | Todos os usos, desde que com estrutura reforçada | Todos os usos |
| Capacidade de absorção* | Média | Boa | Boa | Nula |
| Aspecto visual* | Bom, com possibilidade de variação de cores | Semelhante ao asfalto comum | Semelhante ao concreto comum | |
| Periodicidade de manutenção* | 6 meses a 1 ano | Varia de acordo com o uso (6 meses a 2 anos) | 6 meses a 2 anos | Depende do local |
| Custo de implantação* | Alto | Médio | Médio | Médio |
| Custo de manutenção* | Alto | Médio a alto | Médio a alto | Baixo |
| Resistência/arrancamento* | Boa | Média | Média a boa | Boa |
| Aderência* | Média | Muito boa | Boa | Boa |
| Acústica* | Média | Boa | Boa | Média |

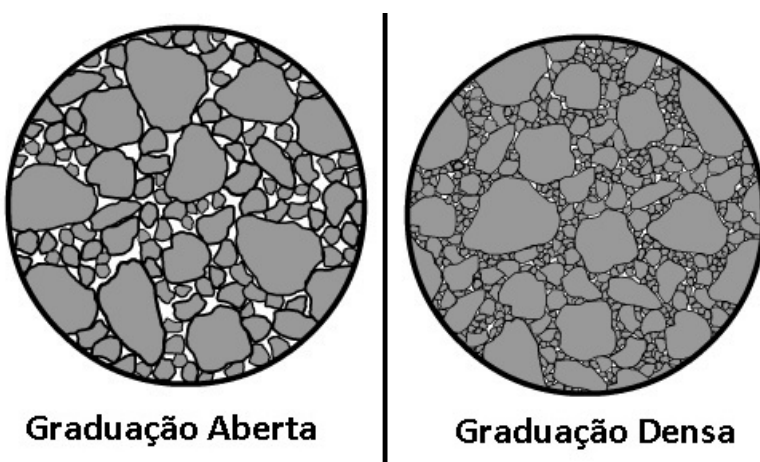
Fonte: *Acioli (2005) adaptado de Azzout *et. al* (1994). OBS: Ao ser analisada a Tabela 4, deve ser considerada a diferença nos custos entre Europa, EUA e Brasil e o ano dos primeiros estudos (1994).

A partir da Tabela 4 podem-se inferir alguns aspectos relativos a cada pavimento, como por exemplo, os blocos vazados tem uma periodicidade maior de manutenção quando comparados aos pavimentos asfálticos porosos e aos de concreto poroso. Ainda, o custo e manutenção dos pavimentos com revestimento impermeável é baixo enquanto os com revestimento permeável variam de médio a alto.

2.17 Mistura asfáltica densa X mistura asfáltica aberta

Tanto o concreto asfáltico denso quanto o concreto asfáltico permeável são misturas asfálticas usinadas a quente, que é o produto final da mistura de agregados das mais variadas granulometrias com cimento asfáltico, aquecidos à determinada temperatura. Estas misturas asfálticas possuem várias subdivisões baseadas na graduação de agregados e fíler. É de interesse deste trabalho destacar dois tipos principais: graduação densa e graduação aberta, como ilustrado nas Figuras 21 e 22.

Figura 20 - Ilustração da secção de dois corpos de prova, sendo um com graduação densa e outro com graduação aberta



Fonte: *Pavement Interactive* (2009)

Figura 21 - Real secção de dois corpos de prova, sendo um com graduação densa e outro com graduação aberta.



Graduação densa

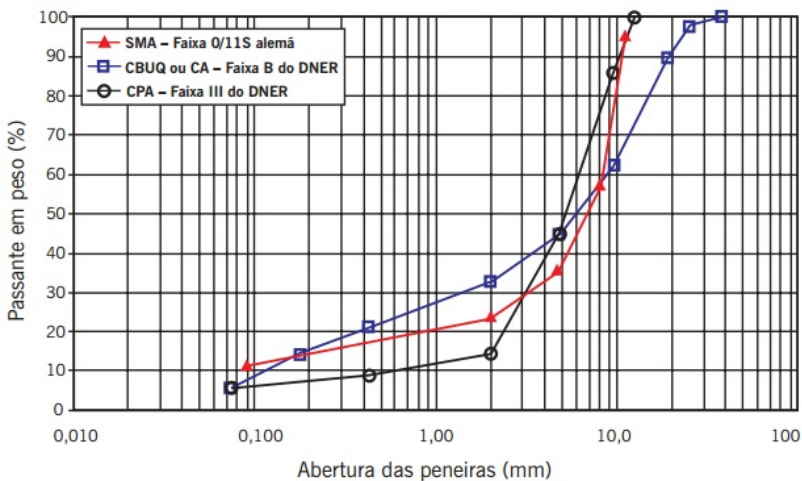


Graduação Aberta

Fonte: Bernucci et al., 2008

A graduação densa enquadra-se numa curva granulométrica contínua e possui um esqueleto mineral praticamente desprovido de vazios tendo em vista que os agregados menores preenchem os vazios dos maiores. A graduação aberta enquadra-se numa curva granulométrica uniforme, com agregados de tamanhos muito semelhantes que geram um “esqueleto mineral com muitos vazios interconectados”, conferindo à mistura a característica de drenante, permitindo a entrada de água na estrutura (Bernucci *et. al*; 2008). A figura 22 ilustra as curvas granulométricas.

Figura 22 - Exemplos de curvas granulométricas de diferentes misturas asfálticas a quente



Fonte: Bernucci et al., 2008

Legenda: SMA = *stone matrix asphalt* (matriz perpétua asfáltica); CPA = camada porosa de atrito, ou concreto asfáltico permeável.

De acordo com Bernucci *et. al* (2008), a mistura asfáltica densa apresenta o volume de vazios, após a compactação, na faixa de 3 a 5% na camada de rolamento e na faixa de 4 a 6% nas camadas intermediárias. Em contrapartida, a mistura asfáltica aberta (componente do concreto asfáltico permeável) possui normalmente entre 18 e 25% de vazios com ar (DNER-ES 386/99) e na França podem chegar a 30%. As faixas granulométricas e requisitos para concreto asfáltico recomendados pelo DNIT 031/20015-ES e as faixas granulométricas e requisitos de dosagem da camada porosa de atrito recomendados pelo DNER-ES 386/99 são mostradas nas Tabelas 5 e 6, respectivamente.

Tabela 5 - Faixas Granulométricas e requisitos para concreto asfáltico (DNIT 031/2004-ES)

| Peneira de malha quadrada | | Faixas | | | |
|--|---------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------|------------|
| | | Porcentagem em massa, passando | | | |
| Série ASTM | Abertura (mm) | A | B | C | Tolerância |
| 2" | 50,8 | 100 | – | – | – |
| 1 ½" | 38,1 | 95–100 | 100 | – | ±7% |
| 1" | 25,4 | 75–100 | 95–100 | – | ±7% |
| ¾" | 19,1 | 60–90 | 80–100 | 100 | ±7% |
| ½" | 12,7 | – | – | 80–100 | ±7% |
| 3/8" | 9,5 | 35–65 | 45–80 | 70–90 | ±7% |
| Nº 4 | 4,8 | 25–50 | 28–60 | 44–72 | ±5% |
| Nº 10 | 2,0 | 20–40 | 20–45 | 22–50 | ±5% |
| Nº 40 | 0,42 | 10–30 | 10–32 | 8–26 | ±5% |
| Nº 80 | 0,18 | 5–20 | 8–20 | 4–16 | ±5% |
| Nº 200 | 0,075 | 1–8 | 3–8 | 2–10 | ±2% |
| Teor de asfalto, % | | 4,0 a 7,0 | 4,5 a 7,5 | 4,5 a 9,0 | ±0,3% |
| Tipo de camada de revestimento asfáltico | | Camada de ligação | Camada de ligação ou rolamento | Camada de rolamento | |

Fonte: Bernucci et al., 2008

Tabela 6 - Faixas Granulométricas e requisitos de dosagem da camada porosa de atrito (DNER-ES 386/99)

| Peneira de malha quadrada | | Faixas | | | | | |
|--|-------------|--------------------------------|--------|-------|-------|--------|------------|
| | | Porcentagem em massa, passando | | | | | |
| ABNT | Abertura mm | I | II | III | IV | V | Tolerância |
| ¾" | 19,0 | – | – | – | – | 100 | – |
| ½" | 12,5 | 100 | 100 | 100 | 100 | 70–100 | ±7 |
| 3/8" | 9,5 | 80–100 | 70–100 | 80–90 | 70–90 | 50–80 | ±7 |
| Nº 4 | 4,8 | 20–40 | 20–40 | 40–50 | 15–30 | 18–30 | ±5 |
| Nº 10 | 2,0 | 12–20 | 5–20 | 10–18 | 10–22 | 10–22 | ±5 |
| Nº 40 | 0,42 | 8–14 | – | 6–12 | 6–13 | 6–13 | ±5 |
| Nº 80 | 0,18 | – | 2–8 | – | – | – | ±3 |
| Nº 200 | 0,075 | 3–5 | 0–4 | 3–6 | 3–6 | 3–6 | ±2 |
| Ligante modificado por polímero, % | | 4,0–6,0 | | | | | ±0,3 |
| Espessura da camada acabada, cm | | 3,0 | | ≤ 4,0 | | | |
| Volume de vazios, % | | 18–25 | | | | | |
| Ensaio Cântabro, % máx. | | 25 | | | | | |
| Resistência à tração por compressão diametral, a 25°C, MPa, mín. | | 0,55 | | | | | |

Fonte: Bernucci et al., 2008

2.18 Uso de ligantes modificados por polímeros

Países como os Estados Unidos fazem grande uso de ligantes convencionais para misturas permeáveis. O seu uso propicia o aparecimento de trincas no pavimento e a desagregação dos agregados, especialmente em locais como intersecções e rampas, onde ocorrem esforços tangenciais (Virgiliis, 2009). Na Europa, os ligantes modificados por polímeros têm sido largamente utilizados.

Segundo Gonçalves *et. al.* (2000), é indicado o uso de ligantes especiais pelo fato deles proporcionarem maior resistência à oxidação dos pavimentos permeáveis, tendo em vista que as misturas permeáveis possuem um alto índice de vazios, o que facilita este fenômeno. Além disso, estes tipos de ligantes conferem maior força na ligação entre as partículas de agregados. De acordo com Virgiliis (2009), como consequência do acréscimo de força nas ligações entre agregados, o tamanho máximo dos agregados pode aumentar, possibilitando a existência de um maior número de vazios, conferindo ao pavimento aumento na taxa de infiltração.

O uso de aditivos poliméricos nos ligantes faz com que estes sejam menos sujeitos ao desagregamento devido ao fato de impedirem que o ligante flua para o interior da estrutura, seja na usinagem ou em sua aplicação no campo (Virgiliis, 2009). De acordo com Kuennen (2003), o ligante modificado por polímero chega a ser seis vezes mais viscoso que o ligante convencional.

Guerreiro (1993) avaliou trechos experimentais revestidos com camadas permeáveis e confeccionadas tanto com ligantes convencionais tanto com ligantes modificados. Com isso, ele pôde observar que os trechos com polímeros tiveram melhor desempenho.

Segundo Ferguson (2005), as modificações nos polímeros têm proporcionado aos pavimentos permeáveis um incremento de cerca de 7 a 11 anos na média de vida dos pavimentos asfálticos porosos.

2.19 Dimensionamento do Pavimento Permeável

“A estrutura do pavimento deve ser dimensionada considerando-se a intensidade da chuva no local e as características do solo, além das condições de tráfego às quais o pavimento estará sujeito” (Marchioni; Silva, 2011).

Tominaga (2013) mostra os dados observados por Rossman (2010) (Tabela 7), onde estão listados todos os dados de entrada

necessários para simular o controle de armazenamento, infiltração e evaporação das águas providas de escoamento superficial.

A Tabela 7 apresenta em função da camada do pavimento (primeira coluna da tabela) os dados que se fazem necessários para concepção de cada camada (segunda coluna da tabela). Na terceira coluna são exemplificados esses dados.

Tabela 7 - Dados de entrada das medidas de controle na fonte

| Camada | Dado de Entrada | Observação |
|-------------|--|---|
| Superficial | Altura do armazenamento (mm) | Profundidade máxima de água acumulada na superfície |
| | Fração da cobertura vegetal (fração) | Fração da camada coberta por vegetação |
| | Rugosidade superficial | Coefficiente de rugosidade n de Manning para pavimentos permeáveis e valas vegetadas, adotar zero para outras medidas |
| | Declividade superficial (%) | Porcentagem da declividade de superficial dos pavimentos permeáveis e valas vegetadas, adotar zero para outras medidas |
| Pavimento | Espessura (mm) | Espessura da camada |
| | Índice de vazios | Valor que indica a relação entre o volume de vazios e o volume de sólidos da camada porosa |
| | Fração da superfície impermeável | Parâmetro aplicável aos sistemas modulares que representa a relação do material impermeável sobre a área total |
| | Permeabilidade (mm/h) | Permeabilidade da camada |
| | Fator de colmatção | Fator de colmatção da camada |
| Solo | Espessura (mm) | Espessura da camada |
| | Porosidade (fração) | Fração do volume de poros em relação ao volume total de solo |
| | Capacidade de campo (fração) | Valor que indica a capacidade máxima de retenção da água, depois de ultrapassado este limite inicia-se a drenagem vertical pela camada de substrato em direção à camada de drenagem |
| | Ponto de murcha (fração) | Teor de umidade mínimo do solo para suportar a vida vegetal, valores abaixo deste limite impossibilitam que as plantas retirem água do solo |
| | Condutividade (mm/h) | Condutividade hidráulica do solo saturado |
| | Declividade da condutividade hidráulica (adimensional) | Declividade da curva da condutividade versus o teor de umidade do solo. Valores típicos sugeridos variam de 5 para areia e 15 para siltes e argilas |
| | Potencial matricial do substrato (mm) | Valor médio do potencial matricial do solo ao longo da frente de umedecimento |

continua

| conclusão | | |
|-------------------|--|--|
| Camada | Dado de Entrada | Observação |
| Armazenamento | Altura (mm) | Altura da camada de armazenamento |
| | Índice de vazios | Valor que indica a relação entre o volume de vazios e o volume de sólidos da camada porosa |
| | Taxa de filtração (mm/h) | Taxa máxima de filtração com que a água é capaz de fluir pelo fundo para fora da estrutura |
| | Fator de colmatação | Fator de colmatação da camada |
| Sistema de drenos | | Expoente n e coeficiente C de drenagem: parâmetros utilizados para o cálculo da densidade de fluxo através do dreno de saída, segundo a eq. (2): |
| | | $q = C(h - H_g)^n \quad (2)$ |
| | | em que: |
| | Coeficiente de drenagem e expoente de drenagem | q : descarga de saída, em mm/hr C : coeficiente de drenagem, em mm/hr, considera a relação entre a altura da água armazenada h e o tempo necessário para drenar este volume T , pela eq. (3): $C = 2 \cdot D^{0,5} / T \quad (3)$ |
| | Altura do dreno (mm) | h : altura da água armazenada, em mm H_g : altura do dreno acima do fundo da camada de armazenamento, em mm n : expoente de drenagem, adimensional, adotar 0,5 como valor típico para que o dreno funcione como um orifício |

Fonte: Tominaga (2013 apud Rossman, 2010).

2.20 Dimensionamento mecânico

Segundo FONTES (2009), a sequência de cálculos do método DNER/81 para o dimensionamento da espessura do pavimento preconizada pelo atual Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), antigo Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER), é a seguinte:

(a) Espessura total do pavimento (H_m)

A espessura total do pavimento é dada pela Equação (2):

$$H_m = 77,67 \times N^{0,0482} \times CBR_{SF}^{-0,598} \quad (2)$$

Onde:

H_m – espessura total do pavimento necessária para proteger o solo de fundação com CBR_{SF} ;

N – número de repetições do eixo simples padrão de 80 kN durante toda a vida de projeto;

CBR_{SF} – Índice de suporte Califórnia do solo de fundação.

(b) Espessura mínima do revestimento (R)

A espessura do revestimento é determinada de modo a proteger a camada de base das cargas geradas pelo tráfego e impedir a ruptura deste revestimento por repetitivos esforços de tração. Esta espessura é dependente do número N , como expressa a Tabela 8.

Tabela 8 - Espessura mínima do revestimento

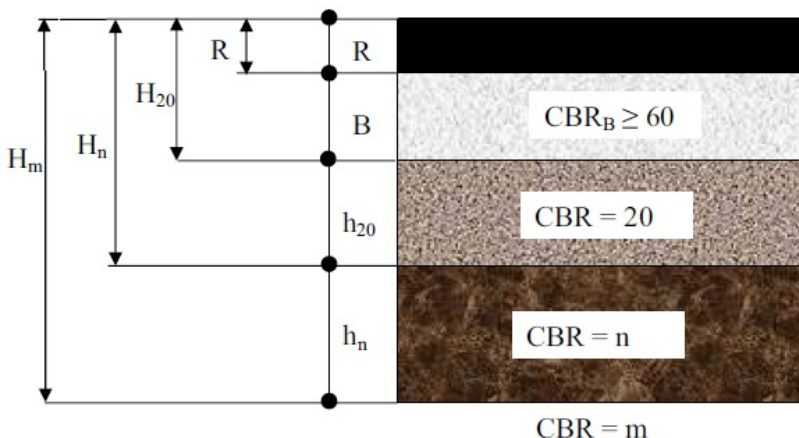
| N | Espessura mínima do revestimento betuminoso |
|-------------------------------|---|
| $N \leq 10^6$ | Tratamentos superficiais betuminosos |
| $10^6 < N \leq 5 \times 10^6$ | Revestimentos betuminosos com 5,0 cm de espessura |
| $5 \times 10^6 < N \leq 10^7$ | Concreto betuminoso com 7,5 cm de espessura |
| $10^7 < N \leq 5 \times 10^7$ | Concreto betuminoso com 10,0 cm de espessura |
| $N > 10^7$ | Concreto betuminoso com 12,5 cm de espessura |

Fonte: DNIT (2006)

(c) Espessura construtiva mínima das camadas granulares

A espessura construtiva mínima das camadas granulares é de 15 cm e é a soma de “B”, “ h_{20} ” e h_n , como representado na Figura 23.

Figura 23 - Altura total do pavimento e índices totalizadores dessa altura



Fonte: Fontes (2009)

Onde, de acordo com Fontes (2009), a simbologia utilizada na Figura 23 representa o que segue:

- H_m é a altura total do pavimento necessária para proteger um material com $CBR = m$;
- h_n é a altura da camada do pavimento com $CBR = n$, também definida como altura da camada de reforço do solo do fundação.
- H_{20} é a altura da camada de revestimento (R) mais a camada de base (B) necessária para proteger um CBR de sub-base 20. Obs: Sempre usa-se os símbolos H_{20} e h_{20} para designar as espessuras de pavimento sobre sub-base e sub-base, respectivamente.

Após determinadas as espessuras R , H_m , H_n e H_{20} , as alturas de base (B), sub-base (h_{20}) e altura de reforço do solo de fundação (h_n), podem ser obtidas através das Inequações 1, 2 e 3 que seguem:

$$RK_R + BK_b \geq H_{20} \quad (1)$$

$$RK_R + BK_b + h_{20}K_S \geq H_n \quad (2)$$

$$RK_R + BK_b + h_{20}K_S + H_nK_{rev} \geq H_m \quad (3)$$

2.21 Dimensionamento hidráulico

Ao se tratar do dimensionamento do pavimento, “A estrutura do pavimento deve ser dimensionada considerando-se a intensidade da chuva no local e as características do solo, além das condições de tráfego às quais o pavimento estará sujeito” (Marchioni; Silva, 2011). De acordo com Virgiliis (2009) o dimensionamento baseia-se na altura final que deve ter o reservatório de forma a acondicionar todo o volume de água gerado na superfície do pavimento. Esse volume de água é provindo da precipitação que é obtida a partir do tempo de um retorno e da duração da chuva.

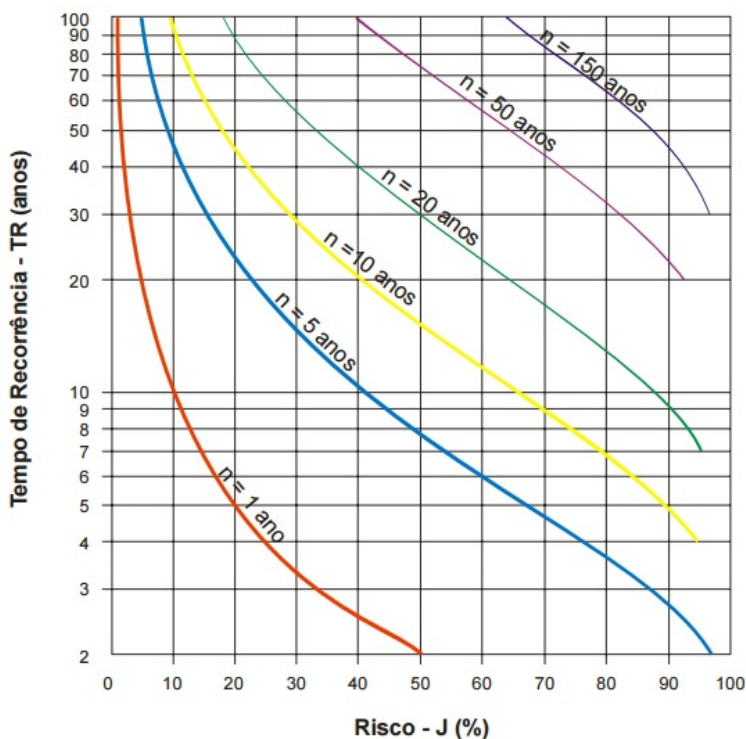
Determinação do período de retorno

De acordo com Tomaz (2010), período de retorno (T) é o período de tempo médio que um determinado evento hidrológico é igualado ou superado pelo menos uma vez, e que para defini-lo é preciso ser levado em consideração o custo das obras e os prejuízos finais.

O DNIT (Brasil, 2005) define a adoção do tempo de retorno com base na obra a se executar, como por exemplo, obras de drenagem profunda e superficial adotar (T) como sendo 10 anos em pontes entre 50 e 100 anos. De acordo com Acioli (2005), adotando-se um tempo de retorno alto tem-se um alto índice de segurança, porém isso implicará em custos elevados e que, portanto, a escolha a ser feita deve ser criteriosa. Por exemplo, a ocorrência de uma inundação numa zona comercial é muito pior do ponto de vista econômico que uma inundação de um estacionamento.

O Manual de Hidrologia Básica do DNIT (Brasil, 2005) preconiza sobre a definição teórica do risco de ruptura de uma obra através de um gráfico apresentado na Figura 24, que ilustra as relações entre probabilidade de risco, tempo de recorrência e vida útil (n, em anos).

Figura 24 - Risco de ocorrência de enchente



Fonte: Manual de Hidrologia Básica do DNIT (2005)

Cedergen (1980) indica para dispositivos de drenagem superficial período de retorno (T) entre 1 e 2 anos e tempo de concentração das chuvas (t) de 1 hora.

Tucci; Porto; Barros (1995) desenvolveram relações entre os períodos de retorno em função do tipo de ocupação, como demonstra a Tabela 9.

Tabela 9 - Relação entre finalidade da obra e Tempo de retorno

| TIPO DE OBRA | TIPO DE OCUPAÇÃO DA ÁREA | T (anos) |
|----------------|--|----------|
| Microdrenagem | Residencial | 2 |
| Microdrenagem | Comercial | 5 |
| Microdrenagem | Áreas com edifícios de serviços ao público | 5 |
| Microdrenagem | Aeroportos | 2-5 |
| Microdrenagem | Áreas comerciais e artérias de tráfego | 5-10 |
| Macro drenagem | Áreas comerciais e residenciais | 50-100 |
| Macro drenagem | Áreas de importância específica | 500 |

Fonte: Pinto (2011 apud Tucci; Porto; Barros, 1995)

Determinação da espessura e volume do reservatório

O reservatório deve possuir tamanho o suficiente para receber o volume das águas providas do escoamento de uma chuva de projeto menos o volume infiltrado no solo de fundação durante a chuva.

- Profundidade do reservatório

A profundidade do reservatório do pavimento permeável é definida pela Equação (3) (Virgiliis, 2009):

$$H = \frac{V_r}{n} \quad (3)$$

Onde:

H – Profundidade do reservatório;

V_r – Altura precipitada, correspondente à duração (t) e o período de retorno (T), em mm;

n – Porosidade do material;

- Intensidade da chuva de projeto

Gonçalves (2011) apresenta a Equação (4), que determina a intensidade máxima de uma chuva de projeto medida em mm/h.

$$I = \frac{a \cdot T^b}{(t+c)^d} \quad (4)$$

Onde :

T – tempo de retorno em anos

I – intensidade da precipitação em mm/h
t – duração em minutos
“a”, “b”, “c” e “d” – parâmetros ajustados para cada localidade ou estação de medição.

- Porosidade (n)

A porosidade dos materiais componentes das camadas de base e sub-base é de suma importância na caracterização da espessura da camada reservatório do pavimento. O fato de o material granular possuir vazios determina o desempenho da estrutura projetada, pois são estes vazios que permitirão que a água da chuva percole, possibilitando assim maior ou menor capacidade de armazenamento desta água.

A porosidade (n) do material é calculada pela Equação (5):

$$n = 1 - \frac{\gamma_d}{G_s \cdot \gamma_w} \quad (5)$$

Onde:

γ_d – Densidade seca do material

G_s – Densidade real dos grãos

γ_w – Densidade da água

- Porosidade média (n_m)

A porosidade média (n_m) para várias camadas é calculada pela Equação (6):

$$n_m = \frac{(h_1 \times n_1) + (h_2 \times n_2) + \dots + (h_n \times n_n)}{h_1 + h_2 + \dots + h_n} \quad (6)$$

Onde:

n_m – porosidade média das camadas;

h_1 – altura da primeira camada granular (cm);

n_1 – porosidade da primeira camada granular;

h_2 – altura da segunda camada granular (cm);

n_2 – porosidade da segunda camada granular;

h_n – altura da enésima camada granular (cm);

n_n – porosidade da enésima camada granular.

Determinação do tempo de esvaziamento do reservatório

O tempo que a água pode permanecer no reservatório, como definido por Schueler (1987) não deve ser superior a 72 horas, de modo a permitir que o solo seque e que o solo consecutivo mantenha suas condições aeróbias.

De acordo com Acioli (2005), o tempo de esvaziamento pode ser determinado pela Equação (7):

$$t_{\text{esv}} = \frac{H}{q_s} \quad (7)$$

Onde:

H – Profundidade média da altura de acumulação do dispositivo (mm)

q_s – Vazão de saída constante do dispositivo (mm/h)

2.22 Manutenção dos pavimentos permeáveis

A manutenção dos pavimentos permeáveis deve ser feita com uso de equipamentos de alta pressão, quatro vezes ao ano. Efetuando corretamente a manutenção, a recuperação da camada de armazenamento da camada reservatório é possível (Diniz, 1980). De acordo com EPA (1999), esses procedimentos ficam estimados em um custo anual de manutenção de US\$ 4,94 por hectare. CIRIA (2000) propõe limpeza a vácuo duas vezes ao ano.

De acordo com Schueler (1987), mesmo durante a execução do pavimento permeável é necessário cuidado, pois há riscos de colmatagem, devendo-se manter os sedimentos fora do pavimento.

Urbonas e Stahre (1993) afirmam que há a possibilidade de selamento do pavimento permeável nos primeiros três anos, necessitando estes de manutenção periódica. Os autores não especificam a periodicidade.

De acordo com Acioli (2005 apud Schueler *et al.* 1992), os principais fatores que geram influência na durabilidade dos pavimentos permeáveis são: possuir uma rotina de limpeza; restringir o acesso de veículos pesados; inspecionar o pavimento permeável tanto na execução quanto durante a vida útil do mesmo e controlar os sedimentos durante a construção.

Apesar dos riscos de falha, pode-se citar um estacionamento construído com pavimento permeável na Reserva Estadual de Walden Pond (Massachusetts), no ano de 1977 e que até o ano de 2001 estava

em uso, sem haver necessidade de grandes restaurações (Keating, 2001). O autor afirma que quando bem projetado e conservado, o pavimento permeável pode chegar a durar tanto quanto o convencional.

Segundo CAMPOS (1998), em casos de desestruturações e “panelas” na superfície com áreas menores que 0,5 m², o defeito pode ser corrigido com uso de misturas betuminosas convencionais, não havendo prejuízo na capacidade drenante ao se analisar o pavimento como um todo. Porém, quando a desestruturação ocorrer em grandes áreas, o defeito deve ser corrigido com uso de misturas betuminosas com características drenantes, as mesmas utilizadas no revestimento permeável (Faure, 1998).

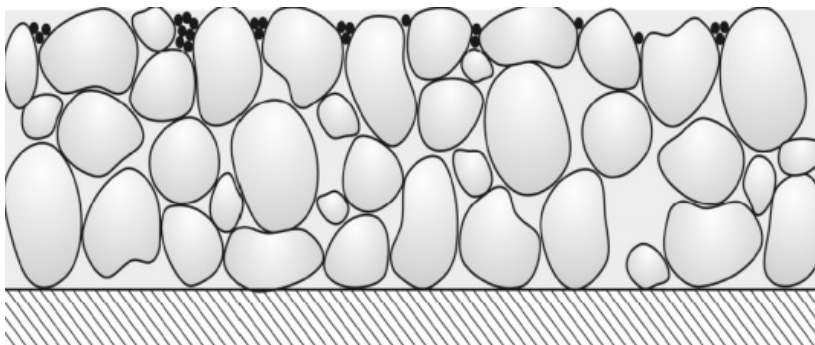
Quando o pavimento permeável chega ao final de sua vida útil, há duas recomendações quanto à manutenção deste pavimento, como explica Virgiliis (2009) baseado no Catálogo de Estruturas Francês (SETRA, 1993):

- 1) Fresagem e substituição da camada existente por uma camada drenante nova;
- 2) Superpor uma nova camada porosa à antiga depois de impermeabilizada por tratamento superficial.

2.23 Colmatação

Baptista *et al.* (2005) afirmam que a colmatação da estrutura do pavimento permeável (entupimento dos poros) é causada pela deposição de partículas nos vazios da camada superior, como mostra a Figura 24. Os autores consideram que a vida útil do pavimento tem uma forte relação com a colmatação, podendo este pavimento, em longo prazo, perder sua função.

Figura 25 - Visualização do efeito da colmatção



Fonte: Pellizzari (2013 apud Castro, 2011).

A intensidade da colmatção depende de fatores regionais, como por exemplo, variedade dos depósitos de material pulverulento e seus tipos. Zonas urbanas são locais onde este problema se acentua. Também há os fatores de tráfego. Quando o tráfego é intenso o fenômeno da colmatção se dá de forma lenta e progressiva pelo fato de existir a sucção provocada pelo tráfego de veículos, que tende a descolmatar os vazios. Ainda, quando o tráfego é pouco intenso e lento, não há sucção suficiente a ponto de descolmatar os vazios, acelerando o processo de colmatção (Virgiliis, 2009).

2.24 Drenagem Urbana

De acordo com SILVA (2008), a drenagem urbana pode ser dividida em sistemas de microdrenagem, sistemas de macrodrenagem e medidas de controle na fonte.

Segundo Silva (2008), a microdrenagem pode ser definida como um sistema de condutos livres para a coleta e condução das águas pluviais. São considerados elementos constituintes da microdrenagem, os meio-fios, as sarjetas, as bocas de lobo, os poços de visita e as galerias. Conforme Tucci *et. al.* (1995), seguem as respectivas definições:

- Meio-fio: constituídos de blocos de concreto ou pedra que se situam entre a via pública e o passeio. Possuem a face superior no nível do passeio, sendo uma faixa paralela ao eixo da via;

- Sarjetas: possuem função de coleta das águas pluviais providas da rua e possuem formato de calha. São faixas formadas pelo limite da via pública com os meio-fios;
- Bocas-de-lobo: são dispositivos de captação das águas pluviais providas das sarjetas e/ou meio-fios;
- Poços de visita: dispositivos posicionados em pontos estratégicos do sistema de drenagem a fim de permitir a manutenção dos mesmos;
- Galerias: constituídas por canalizações com função de escoamento das águas pluviais providas das ligações privadas e bocas-de-lobo;

Por outro lado, a macro drenagem é quem recebe os aportes da microdrenagem, e é constituída por córregos, riachos e rios da zona urbana.

As medidas de controle na fonte promovem a redução e a retenção do escoamento pluvial de forma a aliviar os tradicionais sistemas de esgotamento pluvial, reduzindo e retardando os escoamentos urbanos. Eles são divididos em dispositivos de infiltração e dispositivos de armazenamento (objetos de estudo deste trabalho).

3 MATERIAIS E MÉTODO

Neste capítulo descrevem-se o método e os materiais utilizados no trabalho além dos procedimentos realizados a fim de se alcançar os objetivos gerais.

3.1 Materiais

3.1.1 Projeto base

Dentre os materiais mais relevantes a este trabalho está o projeto de um condomínio residencial de baixo padrão composto por 120 residências, sendo 86 com 2 dormitórios e 62 m² de área cada e 34 com 3 dormitórios e 83 m² cada.

O terreno no qual será implantado o condomínio possui como características construtivas:

- 64.000 m² de área total;
- 4.000 m² de área pavimentada;
- 18.250 m² de área destinada ao uso residencial multifamiliar;
- 4.465 m² de área destinada ao uso esportivo e lazer;
- 32.920 m² destinados à APP (Área de preservação permanente).

3.1.2 Local

O projeto de pavimentação permeável será ficticiamente implantado no condomínio residencial que está sendo atualmente executado no Bairro dos Ingleses, na cidade de Florianópolis, Santa Catarina, na Rodovia Cristóvão Machado de Campos, SN, como mostra a Figura 26.

Figura 26 - Localização do terreno com o uso do *google maps*



Fonte: O Autor (*Google Maps*, 2015)

A imagem da Figura 26 foi obtida a partir do *google maps* e mostra o local exato do terreno com 64.000 m² de área total (área hachurada em vermelho). A Rodovia Cristóvão Machado de Campos é a rua sinalizada em cinza que passa pela frente do terreno.

3.1.3 Planta de implantação

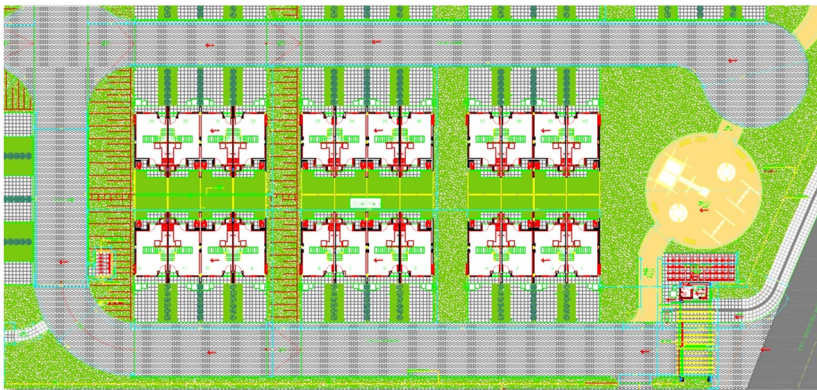
A Figura 25 mostra como será realizada a Implantação do condomínio no terreno disponível e a Figura 26 detalha uma quadra do referido condomínio.

Figura 27 - Planta baixa do condomínio a ser implantado o pavimento permeável



Fonte: MIMA Engenharia (2015)

Figura 28 - Detalhe de uma quadra do condomínio de implantação do pavimento permeável



Fonte: MIMA Engenharia (2015)

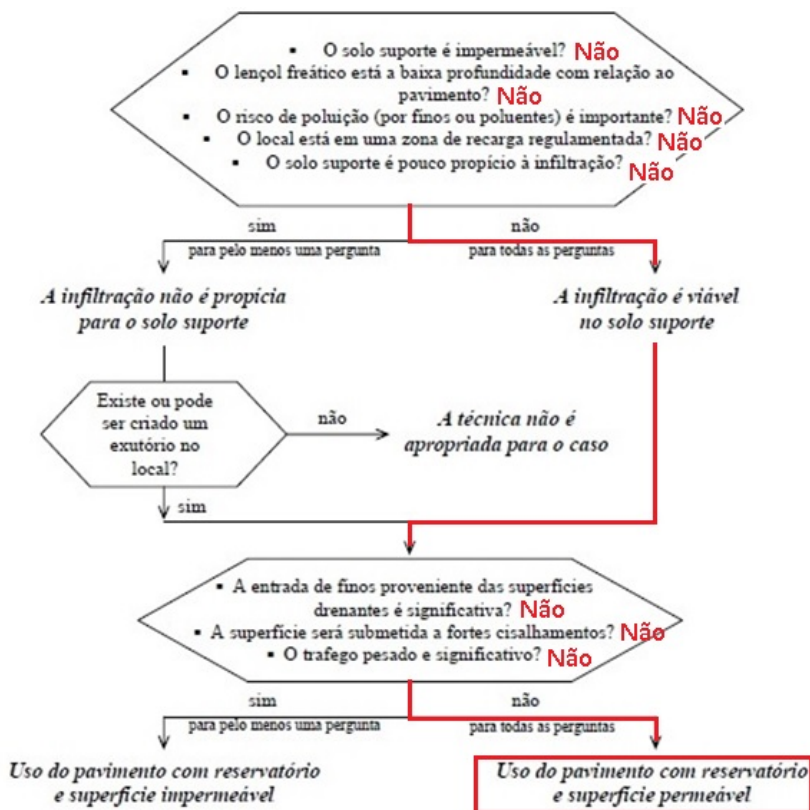
3.2 Método

3.2.1 Análise de viabilidade

Antes de se iniciar qualquer projeto de engenharia é necessário analisar se o que se planeja é a solução mais adequada para o empreendimento final. No caso deste trabalho, é necessário analisar se o local a ser implantado o pavimento permeável é ou não propício a receber esta forma de pavimentação.

Para tanto, será utilizado o fluxograma apresentado na Figura 13 do ítem 2.7, adaptado e representado pela Figura 29.

Figura 29 - Fluxograma de análise de viabilidade de implantação de pavimentação permeável no condomínio deste projeto

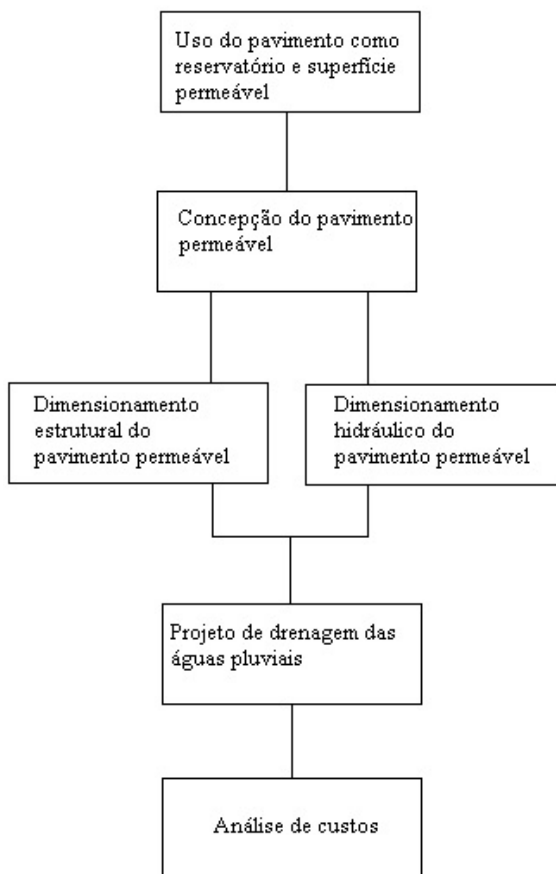


Fonte: Adaptado de Acioli (2005)

Por se tratar de uma implantação fictícia e não se ter conhecimento do solo do referido condomínio, o fluxograma foi alimentado de modo a tornar viável a implantação de pavimento com reservatório e superfície permeável, que é o tema principal deste trabalho. Vale ressaltar que ao se tratar de uma implantação de um projeto real, este fluxograma é de grande valia na decisão de se optar ou não por pavimentação permeável, a partir dos parâmetros no fluxograma mencionados.

Depois de definido o pavimento permeável da forma reservatório, ele será dimensionado e implantado ficticiamente em um condomínio residencial na cidade de Florianópolis, SC. Então, serão analisadas suas vantagens e desvantagens em relação à pavimentação tradicional a partir de análises de custos e possibilidades de reuso das águas pluviais captadas, como apresentado na Figura 30.

Figura 30 - Sequência de atividades



Fonte: O Autor

4 RESULTADOS

4.1 Concepção do Pavimento

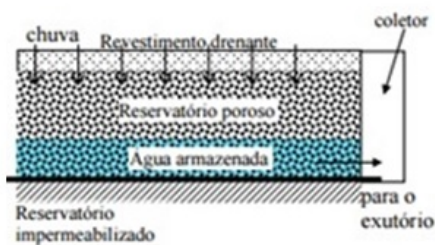
Para atingir os objetivos finais, devem ser selecionados como materiais para pavimentar as ruas do referido condomínio os do tipo que venham a permitir a entrada de água em sua estrutura, ou seja, qualquer um dos materiais para pavimentos permeáveis descritos no Capítulo 2. Para tanto, os revestimentos devem ser permeáveis e as camadas subjacentes de sub-base e base devem ser constituídas de materiais granulares com índice de vazios que permita a passagem e a retenção das águas pluviais.

Além disso, a estrutura do pavimento deve ser dimensionada de tal forma a suportar as cargas transferidas pelo tráfego de veículos.

4.1.1 Tipo de Pavimento a ser implantado

O pavimento a ser implantado será o tipo “C” da Figura 9, com a característica drenante do tipo “C” da Figura 11, ambos apresentados na Figura 30. O pavimento será revestido com material permeável e terá função de armazenamento. Possuirá o fundo de seu reservatório impermeabilizado e haverá uma posterior captação da água pluvial ou devolução para a rede de drenagem, caso exceda o volume máximo do reservatório.

Figura 31 - Tipos de pavimentos escolhidos



Vista Lateral



Vista Frontal

4.1.2 Materiais componentes do pavimento

Para o revestimento será utilizado o concreto asfáltico permeável e para as camadas de base e sub-base serão utilizadas britas graduadas simples e brita 3 (macadame hidráulico), respectivamente.

4.2 Dimensionamento Mecânico do Pavimento

Para o dimensionamento mecânico do pavimento permeável será seguida a sequência de cálculos do método DNER/81, item 2.11.1 deste trabalho.

4.2.1 Tráfego e Índice de Suporte Califórnia (CBR)

De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), o pavimento é dimensionado em função do número equivalente (N) de operação de um eixo tomado como padrão, durante o período de projeto escolhido.

A Instrução de projeto IP – 02 Classificações das Vias (2004), apresentada na Tabela 10, classifica as vias em função do tráfego que está sujeita.

Tabela 10 - Classificação das vias e parâmetros de tráfego

| Função predominante | Tráfego previsto | Vida de projeto | Volume inicial faixa mais carregada | | Equivalente / Veículo | N | N característico |
|------------------------------|------------------|-----------------|--|-----------------|--------------------------|--|---------------------|
| | | | Veículo Leve | Caminhão/Ônibus | | | |
| Via local | LEVE | 10 | 100 a 400 | 4 a 20 | 1,50 | 2,70 x 10 ⁴ a 1,40 x 10 ⁵ | 10 ⁵ |
| Via Local e Coletora | MÉDIO | 10 | 401 a 1500 | 21 a 100 | 1,50 | 1,40x 10 ⁵ a 6,80x 10 ⁵ | 5 x 10 ⁵ |
| Vias Coletoras e Estruturais | MEIO PESADO | 10 | 1501 a 5000 | 101 a 300 | 2,30 | 1,4 x 10 ⁶ a 3,1 x 10 ⁶ | 2 x 10 ⁶ |
| | PESADO | 12 | 5001 a 10000 | 301 a 1000 | 5,90 | 1,0 x 10 ⁷ a 3,3 x 10 ⁷ | 2 x 10 ⁷ |
| | MUITO PESADO | 12 | > 10000 | 1001 a 2000 | 5,90 | 3,3 x 10 ⁷ a 6,7 x 10 ⁷ | 5 x 10 ⁷ |
| Faixa Exclusiva de Ônibus | VOLUME MÉDIO | 12 | | < 500 | | 3 x 10 ⁶ (1) | 10 ⁷ |
| | VOLUME PESADO | 12 | | > 500 | | 5 x 10 ⁷ | 5 x 10 ⁷ |

Fonte: IP – 02, Classificação das Vias (2004)

De acordo com a IP-02 (2004), são consideradas como de tráfego leve as ruas com características residenciais, onde não está sendo previsto tráfego de ônibus, apenas esporadicamente a passagem de caminhões e ônibus, não superior a 20 por dia por faixa de tráfego. Esse tipo de tráfego é caracterizado por um número “N” típico de 10⁵ solicitações do eixo simples padrão (80 KN) para o período de projeto de 10 anos, como demonstra a Tabela 10.

Portanto, para este projeto, devido ao seu caráter extremamente residencial, será adotado um $N=10^5$.

Além disso, será adotado um CBR_{SF} (Índice de Suporte Califórnia do solo de fundação) = 8,0%.

4.2.2 Espessura total do pavimento (H_m)

A espessura total do pavimento necessária para proteger o solo de fundação com CBR_{SF} é dada pela Equação (2):

$$H_m = 77,67 \times N^{0,0482} \times CBR_{SF}^{-0,598}$$

Como já determinado para o pavimento deste projeto, $N = 10^5$ e $CBR_{SF} = 8,0\%$, o que resulta em $H_m \cong 40$.

4.2.3 Espessura mínima do revestimento (R)

A espessura do revestimento é determinada de modo a proteger a camada de base das cargas geradas pelo tráfego e impedir a ruptura deste revestimento por repetitivos esforços de tração. Esta espessura é dependente do número N , como expresso na Tabela 8 do item 2.11.1. Com base nesta tabela, para o pavimento deste projeto, seriam necessários apenas tratamentos superficiais betuminosos.

Porém, será adotada a mesma espessura adotada por Virgiliis (2009) em seus estudos com o mesmo tipo de pavimento, onde $R = 5,0$ cm (espessura do revestimento), tendo em vista a possibilidade de ocorrência de colmatagem na camada de revestimento.

4.2.4 Espessura mínima das camadas granulares

A espessura construtiva mínima das camadas granulares é de 15 cm e é a soma de “B”, “ h_{20} ” e h_n , como representado na Figura 23.

Para o pavimento em estudo será necessário apenas determinar as alturas das camadas de base (B) e sub-base (h_{20}), tendo em vista que não haverá necessidade de reforço de sub-leito (h_n).

Após determinadas as espessuras R , H_m , H_{20} , as alturas de base (B), sub-base (h_{20}) podem ser obtidas através das inequações (1) e (2), respectivamente:

$$\begin{aligned} RK_R + BK_b &\geq H_{20} \\ RK_R + BK_b + h_{20}K_s &\geq H_m \end{aligned}$$

Onde os coeficientes K_R , K_b e K_s podem ser determinados pela Tabela 11.

Tabela 11- Coeficientes (K) de equivalência estrutural

| Componentes do pavimento | Coeficiente K |
|---|----------------------|
| Base ou revestimento de concreto betuminoso | 2,00 |
| Base ou revestimento pré-misturado a quente, de graduação densa | 1,70 |
| Base ou revestimento pré-misturado a frio, de graduação densa | 1,40 |
| Base ou revestimento betuminoso por penetração | 1,20 |
| Camadas granulares | 1,00 |
| Solo cimento com resistência à compressão a 7 dias, superior a 45 kg/cm | 1,70 |
| Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 45 kg/cm e 28 kg/cm | 1,40 |
| Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 28 kg/cm e 21 kg/cm | 1,20 |

Fonte: DNIT (Brasil, 2006)

Portanto, com base na Tabela 11, para a camada de revestimento será adotado $K_R = 2$ e para as camadas de base (K_b) e sub-base (K_s) será adotado $K = 1$, por se tratarem de camadas granulares.

Para solucionar as equações acima descritas é necessário ainda determinar a espessura H_{20} . Através da Equação (2) adaptada ($H_{20} = 77,67 \times N^{0,0482} \times CBR_{20}^{-0,598}$) obtêm-se $H_{20} \cong 23$ cm para $N = 10^5$ e $CBR = 20$.

Em resumo, são os seguintes parâmetros necessários ao dimensionamento:

- $R = 5$ cm;
- $B =$ incógnita;
- $H_{20} = 23$ cm;
- $h_{20} =$ incógnita;
- $K_R = 2$;
- $K_b = 1$;
- $K_s = 1$;
- $H_m = 40$ cm.

Substituindo estes valores na Inequação (1) temos:

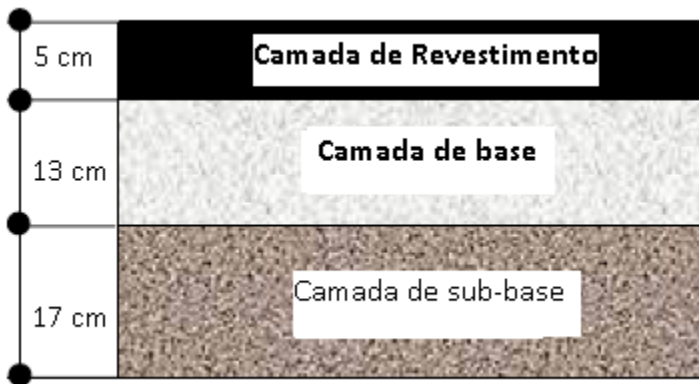
$$5.2 + B.1 \geq 23 \therefore B \geq 13$$

Substituindo os valores obtidos na Inequação (2) temos:

$$5.2 + 13.1 + h_{20}1 \geq 40 \therefore h_{20} \geq 17$$

Portanto, as camadas de base (B) e sub-base (h_{20}) devem ter no mínimo 13 e 17 cm, respectivamente, ficando o pavimento com a configuração mostrada na figura 30.

Figura 32- Configuração final do pavimento



Fonte: O autor

4.3 Dimensionamento Hidráulico do Pavimento

O reservatório deve possuir tamanho o suficiente para receber o volume das águas providas do escoamento de uma chuva de projeto menos o volume infiltrado no solo de fundação durante a chuva. No caso deste projeto, o reservatório será dimensionado apenas para acomodar o volume das águas da chuva provindo do escoamento, tendo em vista que o fundo do reservatório será revestido com manta impermeável, de modo a não permitir a infiltração das águas no solo de fundação e, portanto, não pertencentes ao cálculo.

4.3.1 Período de Retorno (T) e tempo de concentração (t)

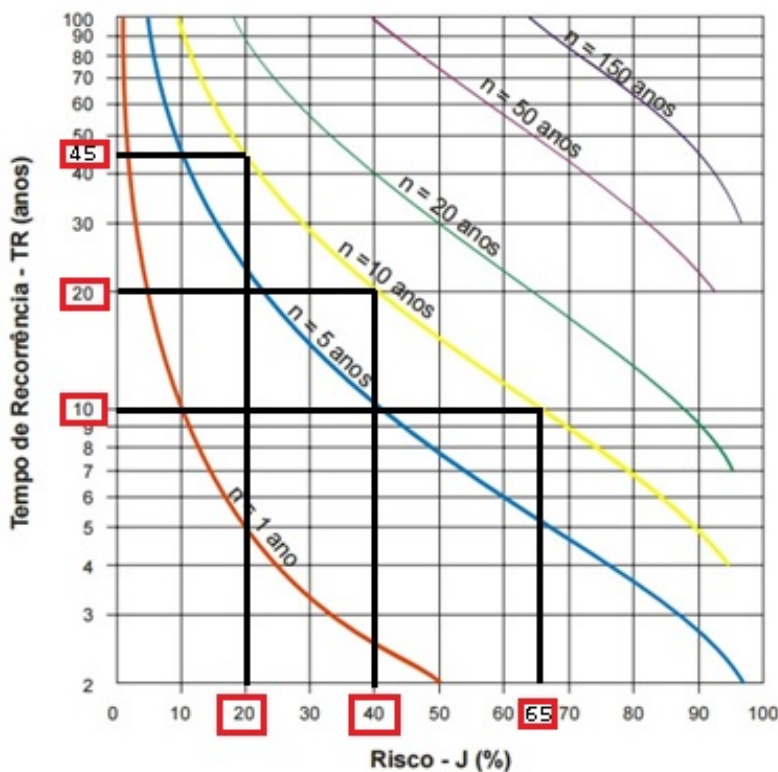
Como afirma Acioli (2005), quanto maior o período de retorno escolhido maior será a segurança e em contra partida, maior serão os custos com o pavimento.

O ábaco presente na Figura 24 do item 2.11.2 presente no Manual de Hidrologia Básica do DNIT (2005) que ilustra as relações entre probabilidade de risco, tempo de recorrência e vida útil da obra (n, em anos) é apresentado na Figura 32. Este define um risco (J%) de ocorrer uma enchente baseado no horizonte de projeto e no tempo de retorno definido para o projeto.

O pavimento permeável a ser aplicado no condomínio será dimensionado para um horizonte de projeto de 10 anos. Portanto, Na Figura 32 foi utilizado (n) como sendo 10 anos e foram feitas 3 suposições de tempo de retorno (T) que apresentaram os seguintes riscos:

- Vida útil (n) de 10 anos e tempo de retorno (T) de 10 anos resultam em um risco de aproximadamente 65% de ocorrer “enchente”;
- Vida útil (n) de 10 anos e tempo de retorno (T) de 20 anos resultam em um risco de aproximadamente 40 % de ocorrer “enchente”;
- Vida útil (n) de 10 anos e tempo de retorno (T) de 40 anos resultam em um risco de aproximadamente 20% de ocorrer “enchente”.

Figura 33 - Risco de ocorrência de enchente no projeto em questão



Fonte: Manual de Hidrologia Básica do DNIT (2005)

Porém, como será exemplificado no projeto de drenagem do pavimento, toda a água armazenada no pavimento será direcionada a um reservatório secundário, que assim que estiver cheio bombeará a água para as edificações e, caso não haja demanda, este extravasará o excesso para a rede de águas pluviais, não necessitando portanto adotar-se tempos de retorno tão altos afim de obter-se riscos de enchentes baixos.

Cedergen (1980) indica para dispositivos de drenagem superficial período de retorno (T) entre um e dois anos e tempo de concentração das chuvas (t) de 1 hora.

Tucci; Porto; Barros (1995) apresentam a Tabela que segue (Tabela 9 do item 2.11.2) que relacionada a finalidade da obra com o tempo de retorno (em anos).

| TIPO DE OBRA | TIPO DE OCUPAÇÃO DA ÁREA | T (anos) |
|----------------|--|----------|
| Microdrenagem | Residencial | 2 |
| Microdrenagem | Comercial | 5 |
| Microdrenagem | Áreas com edifícios de serviços ao público | 5 |
| Microdrenagem | Aeroportos | 2-5 |
| Microdrenagem | Áreas comerciais e artérias de tráfego | 5-10 |
| Macro drenagem | Áreas comerciais e residenciais | 50-100 |
| Macro drenagem | Áreas de importância específica | 500 |

Fonte: Pinto (2011) apud Tucci; Porto; Barros, 1995)

Portanto, devido a estes três fatores que o período de retorno escolhido será de dois anos:

- O fato de Cedergen (1980), que estudou a drenagem de pavimentos rodoviários, preconizar como este sendo um bom tempo a ser escolhido para dispositivos de drenagem superficial;
- O fato de Tucci; Porto; Barros (1995) sugerirem para microdrenagem com a finalidade residencial adotar-se um período de retorno de dois anos;
- O fato do pavimento drenante a ser implantado ser dotado de uma drenagem inferior que conduzirá toda a água pluvial armazenada no pavimento para um reservatório secundário, minimizando o risco de enchentes.

O tempo de concentração das chuvas (t) será de uma hora, também preconizado Cedergen (1980).

4.3.2 Intensidade pluviométrica

De acordo com a Equação (4) pode-se determinar a intensidade máxima de uma chuva de projeto medida em mm/h.

$$I = \frac{a \cdot T^b}{(t+c)^d} \quad (4)$$

O tempo de retorno (T) e o tempo de concentração (t) já foram determinados no item anterior e são iguais a dois anos e a 60 minutos, respectivamente.

Os parâmetros “a”, “b”, “c” e “d” variam para cada localidade ou estação de medição.

Gonçalves (2011), em seu estudo das Relações entre Intensidade – Duração – Frequência (IDF), apresentou a tabela 10 com os parâmetros para algumas cidades do território Brasileiro, dentre as quais está Florianópolis.

Tabela 12 - Parâmetros das relações IDF existentes empregadas

| LOCALIDADE | a | b | C | D | R2 | FONTE |
|--------------------------|----------------------|-------|--------|-------|----------|-------|
| Porto Alegre (RS) | 816,598 | 0,167 | 12 | 0,760 | 0,99911 | (1) |
| Porto Alegre – 8ª DISME | 1297,900 | 0,171 | 11,619 | 0,850 | - | (2) |
| Porto Alegre – Aeroporto | 826,806 | 0,143 | 13,326 | 0,793 | - | (2) |
| Cruz Alta (RS) | 1419,000 | 0,190 | 12 | 0,800 | - | (1) |
| Florianópolis (SC) | 1754,242 | 0,187 | 36 | 0,823 | 0,99869 | (1) |
| Curitiba (PR) | 998,280 | 0,178 | 9 | 0,784 | 0,99942 | (1) |
| São Paulo (SP) | 29,130 [#] | 0,181 | 15 | 0,890 | - | (3) |
| Lins (SP) | 430,500 | 0,300 | 12 | 0,740 | - | (1) |
| Rio de Janeiro (RJ) | 1239,000 | 0,150 | 20 | 0,740 | - | (3) |
| Formosa (GO) | 14,6625 [#] | 0,164 | 8 | 0,748 | 0,999476 | (4) |
| Brasília (DF) | 1574,700 | 0,207 | 8 | 0,884 | 0,99800 | (5) |
| Aracajú (SE) | 834,205 | 0,179 | 15 | 0,726 | 0,99551 | (1) |
| Fortaleza (CE) | 1408,613 | 0,167 | 12 | 0,778 | 0,99869 | (1) |
| Teresina (PI) | 1248,856 | 0,177 | 10 | 0,769 | 0,99861 | (1) |
| São Luiz (MA) | 1519,371 | 0,161 | 28 | 0,777 | 0,99764 | (1) |
| Belém (PA) | 1085,508 | 0,156 | 12 | 0,758 | 0,99551 | (1) |
| Manaus (AM) | 1136,504 | 0,158 | 10 | 0,764 | 0,99819 | (1) |
| Porto Velho (RO) | 1182,378 | 0,159 | 11 | 0,757 | 0,99664 | (1) |
| Rio Branco (AC) | 1419,345 | 0,162 | 18 | 0,795 | 0,99779 | (1) |

Fonte: (1) Fragoso Jr. (2004); (2) Bemfica *et al.*, (2008); (3) Bertoni e Tucci, (1993); (4) Bravo *et al.*(2008); (5) Distrito Federal (2009). **Nota:** # em mm/min.

Portanto, a partir da tabela 12 pode-se inferir que parâmetros são:

- (a) 1754,242
- (b) 0,187
- (c) 36
- (d) 0,823

Substituindo o Tempo de retorno (T), o tempo de concentração (t) e os parâmetros “a”, “b”, “c” e “d” obtêm-se a intensidade máxima da chuva de projeto (I) igual a aproximadamente 46,66 mm/h, que pode ser assumido como 47 mm/h.

4.3.3 Porosidade (n)

Para a determinação da porosidade (n) de cada camada granular devem ser realizados ensaios para a obtenção dos valores a serem inseridos na equação de cálculo da porosidade (Equação 5), como γ_d (densidade seca do material), G_s (densidade real dos grãos) e γ_w (densidade da água).

Os materiais a serem utilizados nas camadas de base e sub-base do pavimento permeável deste trabalho são a brita graduada simples e a brita 3 (macadame hidráulico), respectivamente. Como não é o objetivo deste trabalho a realização de ensaios laboratoriais, foram utilizados os dados ensaiados por Virgiliis (2009) para estes mesmos materiais. Os resultados obtidos são demonstrados nas Tabelas 13 e 14.

Tabela 13 - Densidade dos grãos ensaiados por Virgiliis (2009)

| PARÂMETROS DO ENSAIO | AMOSTRA | |
|-------------------------------------|------------------------|----------|
| | Brita graduada simples | Brita 3 |
| Peso seco da amostra (g) | 2.428,3 | 3.585,0 |
| Peso úmido(g) | 2.578,3 | 3.606,51 |
| Peso imerso (g) | 1.525,0 | 2.280,71 |
| Temperatura (°C) | 25,0°C | 25,0°C |
| Densidade real dos grãos (g/cm³) | 2,643 | 2,704 |

Fonte: Virgiliis (2009)

Tabela 14 - Porosidade das camadas compactadas ensaiadas por Virgiliis (2009)

| PARÂMETROS DE CÁLCULO | CAMADA | |
|--|------------------------|---------|
| | Brita graduada simples | Brita 3 |
| Massa Específica aparente (g/cm³) - γ_d | 2,169 | 1,491 |
| Densidade real dos grãos (g/cm³) - G_s | 2,643 | 2,704 |
| Densidade da água a 25,0 °C - γ_w | 1,000 | 1,000 |

Fonte: Adaptado de Virgiliis (2009)

Através dos dados ensaiados por Virgiliis (2009) é então possível calcular a porosidade da BGS e da brita 3, com os dados obtidos inseridos na Equação 5:

- Cálculo da porosidade da BGS:

$$n_{BGS} = 1 - \frac{2,169}{2,643 \cdot 1,0} \cong 0,18$$

- Cálculo da porosidade da Brita 3:

$$n_{\text{Brita 3}} = 1 - \frac{1,491}{2,704 \cdot 1,0} \cong 0,45$$

4.3.4 Profundidade do reservatório

Para determinar a profundidade do reservatório do pavimento permeável será utilizada a equação (3):

$$H = \frac{V_r}{n} \quad (3)$$

Onde:

H – Profundidade do reservatório;

V_r – Altura precipitada, correspondente à duração (t) e o período de retorno (T), em mm;

n – Porosidade do material.

A altura precipitada (V_r) é na verdade a altura de água precipitada que será acomodada no interior do reservatório do pavimento, pois não necessariamente toda a água precipitada entrará no pavimento. O que demonstrará se toda a água adentrará ao pavimento será o coeficiente de permeabilidade (K) do pavimento, que deve ser maior que intensidade máxima da chuva de projeto (I).

Como determinado anteriormente, a intensidade máxima da chuva de projeto calculada para este local especificamente, é de 47 mm/h;

Como apresentado na revisão bibliográfica, Pinto (2011), através de ensaios com permeâmetro de carga constante determinou como sendo o coeficiente de permeabilidade (K) dos pavimentos de concreto asfáltico poroso igual a 1,6 mm/s, o que o torna capaz de absorver a totalidade da máxima chuva de projeto.

Portanto, pode-se assumir (V_r) como sendo 47mm/h.

A camada reservatório será a sub-base de brita 3, que como determinado anteriormente, possui porosidade de 45% (0,45).

Substituindo estes dados na Equação (3) que determina a altura H da camada reservatório hidráulico, obtemos $H = 10,4$ cm/h. Como foi assumida a duração da chuva máxima de projeto como sendo

uma hora (60 min), temos que $H = 10,4$ cm, que será assumida como igual a 11 (facilidade de execução).

Portanto, a camada reservatório deverá ser executada com no mínimo 11 centímetros de brita 3 para satisfazer o dimensionamento hidráulico do pavimento.

4.4 Avaliação do dimensionamento mecânico X dimensionamento hidráulico

As espessuras de base e sub-base a serem adotadas devem atender tanto ao dimensionamento mecânico quanto ao dimensionamento hidráulico.

No cálculo do dimensionamento mecânico do pavimento foram encontrados como espessuras mínimas para as camadas de base e sub-base 13 e 17 cm, respectivamente.

No cálculo do dimensionamento hidráulico foi encontrado como espessura para a sub-base (foi assumido que somente ela terá função de armazenamento), 11 cm.

Portanto, a fim de atender a ambos os dimensionamentos, serão adotadas como espessura de base e sub-base 13 e 17 cm, respectivamente.

4.5 Perfil final do pavimento

Logo abaixo da camada de sub-base e antes do subleito é necessária a implantação de uma geomembrana impermeável para impedir que a água percole para o subleito. Porém como demonstrado por Virgiliis (2009) foi comprovada a necessidade do uso de uma camada de pó de pedra acima da geomembrana a fim de proteger a mesma contra perfurações. Inicialmente foi utilizado 5 cm de areia fina ao invés do pó de pedra mas seu uso não foi apropriado, onde não eram eliminadas as dobras e enrugamentos da geomembrana, o que permitia a formação de pequenas poças que impediam que a água infiltrada escoasse para o dreno. Por este fato, foi indicado o uso de uma camada de 10 centímetros de pó de pedra diretamente sobre a geomembrana para sanar os possíveis defeitos de rasgo da geomembrana e problemas de escoamento da água diretamente para o dreno.

Como demonstrado em 3.9, foi adotado como espessura para camada de base 13 cm e de sub-base 17 cm, a fim de atender a ambos os dimensionamentos (mecânico e hidráulico). Porém neste cálculo não

foram considerados os 10 centímetros de pó de pedra. Por isso, o perfil do pavimento permeável foi refeito de modo a ficar como apresentado na Figura 33.

Figura 34 - Perfil final do pavimento permeável



Fonte: adaptado de Virgiliis (2009)

Cabe salientar que a redução de 17 centímetros da camada de sub-base para 15 centímetros é aceitável tanto do ponto de vista estrutural quanto do ponto de vista hidráulico pois haverá mais 10 centímetros de suporte logo abaixo da mesma, conferindo resistência. Além do mais, de acordo com o dimensionamento hídrico, só se faziam necessários 11 centímetros de sub-base para acomodação das águas pluviais.

4.6 Drenagem das águas pluviais

4.6.1 Introdução

O projeto de drenagem deste condomínio será constituído por controle de escoamento na fonte, que se trata do pavimento permeável, e de condutos subterrâneos que irão compôr o sistema de microdrenagem do pavimento.

4.6.2 Áreas contribuintes

As edificações não serão consideradas áreas contribuintes de águas pluviais para o sistema de drenagem. Será assumido que as águas precipitadas sobre as edificações serão coletadas por calhas que por sua vez destinarão as águas pluviais para o sistema urbano.

Além disso, microbacias de contribuição também não existirão, tendo em vista que áreas que não forem consideradas edificações ou pavimento permeável serão jardins que, por sua vez terão capacidade de absorver a totalidade das águas providas das chuvas, não gerando escoamento superficial e, portanto, não contribuindo no volume de água captada.

Portanto, apenas serão consideradas como áreas contribuintes de águas pluviais para o sistema de drenagem as áreas pavimentadas com pavimento permeável.

4.6.3 Características do Terreno

O terreno é praticamente plano, havendo um desnível de apenas 3 metros em 250 metros de extensão do terreno, gerando aproximadamente 1% de declividade. A Figura 34 demonstra as curvas de nível do terreno.

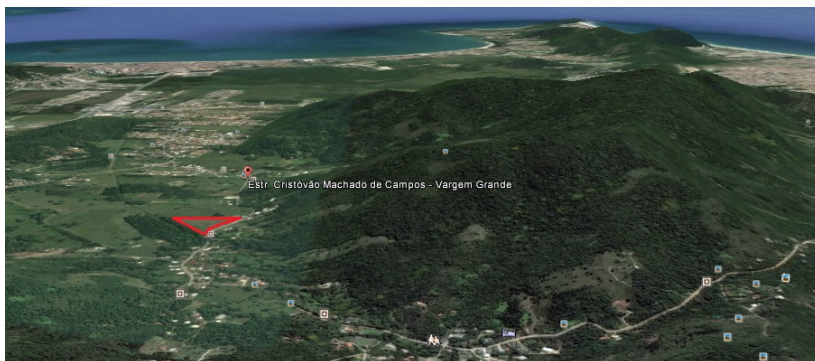
Figura 35 - Curvas de nível do terreno



Fonte: MIMA Engenharia (2015)

Outra forma de demonstrar a planicidade do terreno é através da imagem da Figura 36, obtida através do *Google Earth 3D*, onde está demonstrada em vermelho a localização do terreno.

Figura 36 - Imagem de satélite (Google Earth 3D)



Fonte: Google Earth 3D (2015)

4.6.4 Considerações para a concepção do projeto de drenagem

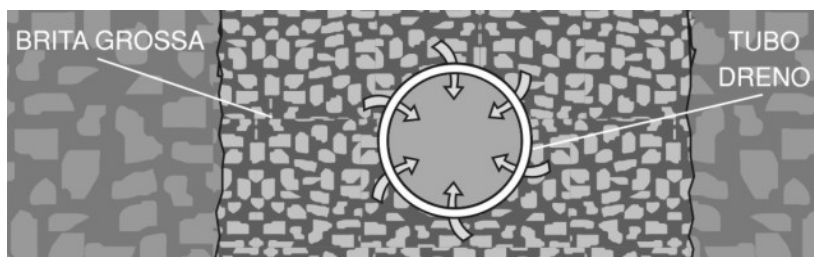
O dimensionamento hidráulico do pavimento permeável já foi realizado, portanto já está atendido o critério de escoamento na fonte.

Será assumido que toda a água da chuva adentrará ao pavimento, não sendo necessário o uso de dispositivos superficiais de microdrenagem, como sarjetas e boca de lobo. Vale ressaltar que em uma situação real a infiltração total não ocorreria, pois haveria, mesmo que irrisório, certo escoamento superficial (seja pela não capacidade infiltradora do pavimento, seja pela declividade da pista) se fazendo necessária a execução de algum destes dispositivos de microdrenagem. Há também o fato da colmatagem do pavimento permeável, que ao longo dos anos faz com que ele perca parte de sua capacidade de infiltração da água, gerando um maior escoamento superficial e novamente, seriam necessários dispositivos de microdrenagem.

Toda a água captada pelo pavimento e posteriormente armazenada na camada reservatório deverá ser destinada a um reservatório principal implantado estrategicamente nos fundos do condomínio que compõe o ponto mais baixo do terreno (curva de nível 8 m). Então, as águas pluviais provindas da camada reservatório do pavimento permeável serão conduzidas por gravidade até o reservatório

principal. A forma como serão conduzido irá compor o sistema de microdrenagem do pavimento, que será por meio de tubos de PVC (Policloreto de Vinila) perfurados, como ilustra a Figura 37.

Figura 37 - Dreno profundo perfurado



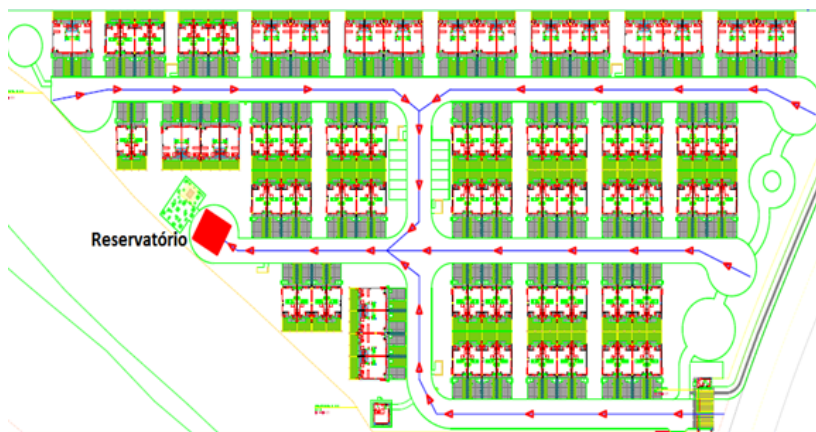
Fonte: Adaptado de Enciclopédia Tigre (2015)

Como apresentado na Figura 37, o dreno ficará posicionado na camada reservatório de Brita 3, e toda a água que adentrar ao pavimento será conduzida para dentro do dreno que levará a água para o reservatório principal.

O caminho que as águas irão percorrer até chegar ao reservatório principal é mostrado na Figura 38.

Como pode ser observado na Figura 38, em azul está sendo representado o dreno profundo ilustrado na Figura 37 e as setas em vermelho estão indicando a direção do fluxo d'água, que culminará no reservatório principal, também representado em vermelho.

Figura 38 - Sentido de escoamento da água por gravidade



Fonte: O Autor

4.6.5 Dimensionamento do reservatório principal

A chuva de projeto foi determinada como sendo de 47mm/h, com duração prevista de uma hora. A área a ser pavimentada com pavimento permeável é de 4.000 m². Como assumido anteriormente, toda a água da chuva será captada, não havendo perdas para outros sistemas como evaporação ou escoamento superficial, por exemplo. Portanto, precipitando uma altura de 47 mm em uma hora, é gerado um volume máximo de 188 m³ de águas pluviais a serem captadas em todos os 4.000 m² de área pavimentada.

São vários os tamanhos de reservatórios possíveis de comportar tal volume de água. Neste trabalho será considerado um reservatório quadrado, a ser executado em concreto armado, moldado *in loco*, enterrado (funcionando como uma cisterna) com as seguintes dimensões: 8 metros de lado por 3 metros de profundidade, capaz de armazenar 192 m³ de água, atendendo, portanto, o máximo volume captado por todo o pavimento em uma chuva de projeto.

4.7 Redistribuição das águas pluviais captadas no reservatório principal

Como demonstrado até agora, as águas pluviais captadas por meio do pavimento permeável serão armazenadas no reservatório principal. A água armazenada será então destinada às residências para que possam ser utilizadas nos jardins, em lavagens de carros, sem tratamento algum. Se houver um posterior tratamento desta água (não se entrará neste mérito neste trabalho) ela poderá ser destinada a usos internos como descarga de vaso sanitário ou em máquinas de lavar roupa. A destinação desta água às edificações deverá ser feita por meio de bombas, tendo em vista que o reservatório será enterrado e o fluxo da água será contrário ao sentido de escoamento das águas captadas através do pavimento permeável que é dado por gravidade.

4.8 Roteiro para análise de custos

A partir da média anual da pluviosidade na região do Norte da Ilha, será calculada a quantidade de água pluvial armazenada mensalmente através da Equação (8)

$$Q = Pl \times A \quad (8)$$

Onde:

Q – Quantidade de água pluvial armazenada mensalmente
(m³)

Pl – Média da Pluviosidade Mensal (m)

A – Área a ser pavimentada (m²)

Ao se efetuar o produto da quantidade de água armazenada pelo custo do m³ fornecido pela distribuidora de água de Florianópolis, a Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN), obtêm-se o quanto o usuário economizará mensalmente (Equação 9) – partindo do pressuposto de que toda água armazenada terá o destino de substituir uma água que antes vinha da rede de distribuição:

$$E = Q \times P \quad (9)$$

Onde:

E – Economia mensal (R\$)

Q – Quantidade de água pluvial armazenada mensalmente
(m³)

P – Preço do m³ de água distribuída pela rede

Para determinar em quanto tempo o sistema de pavimento permeável se torna economicamente viável, primeiramente é necessário saber quanto se gastará a mais na implantação deste pavimento em comparação com o convencional (Equação 10):

$$Dc = Cp - Ct \quad (10)$$

Onde:

Dc – Diferença entre os custos de implantação do sistema permeável e o tradicional (R\$)

Cp – Custo de implantação do sistema de pavimentação permeável (R\$)

Ct – Custo de implantação do sistema de pavimentação convencional (R\$)

Os custos de implantação dos sistemas de pavimentação asfáltica permeável e tradicional serão estimados por m², com base em bibliografias anteriores.

Por fim, para determinar o tempo de retorno do investimento (Tr) (Equação 11) deve-se dividir a diferença entre os custos de implantação do sistema permeável e o sistema tradicional (Dc) pela economia advinda da captação de água da chuva (E).

$$Tr = \frac{Dc}{E} \quad (11)$$

Onde:

Tr – Tempo de retorno do investimento (meses)

Dc – Diferença entre os custos de implantação do sistema permeável e o sistema tradicional

E – Economia mensal (R\$)

Ou seja, o “tempo de retorno do investimento” é função dos índices pluviométricos do local, da área a ser pavimentada, do coeficiente de permeabilidade do pavimento, do preço cobrado pela água pela distribuidora e da complexidade do sistema implantado.

4.9 Alimentação do Roteiro para análise de custos

Neste tópico será alimentado o roteiro do item 3.13 de modo a obterem-se resultados para as incógnitas mencionadas neste roteiro.

4.9.1 Cálculo do armazenamento mensal

A Tabela 15 mostra um resumo das médias mensais precipitadas na cidade de Florianópolis entre os anos de 1981 e 2010. Os dados foram colhidos na Base Aérea da cidade.

Tabela 15 - Resumo geral das médias mensais de precipitação dos anos de 1981 a 2010 (série completa)

| Mês | JAN | FEV | MAR | ABR | MAI | JUN | JUL | AGO | SET | OUT | NOV | DEZ | Média anual |
|--------------------------------|-----|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|-------|-----|-----|-------|-------------|
| Precipitação média mensal (mm) | 226 | 195,2 | 158,1 | 116,5 | 129,4 | 78,9 | 109,4 | 78,4 | 128,4 | 132 | 147 | 165,1 | 1656,8 |

Fonte: *Hidroweb* (2015)

Portanto, será utilizada uma precipitação total anual de 1650 mm, que dividida pelos 12 meses do ano resulta em aproximadamente 138 milímetros mensais ou 0,138 metros mensais. A área a ser pavimentada é de 4.000 m². Substituindo estes dados na Equação (8) tem-se:

$$Q = 0,138 \times 4.000 \therefore Q = 552 \text{ m}^3$$

Ou seja, pode-se armazenar até 552 m³ de água mensalmente.

4.9.2 Cálculo da economia mensal

A Figura 38 demonstra como é feita a cobrança de tarifa de água de acordo com o gasto mensal em m³ pela CASAN.

Figura 39 - Tabela de preços da CASAN

| Residencial | | | |
|--|-------|----------------|------------------------|
| Aplica-se aos imóveis com ocupação exclusiva para fins de moradia | | | |
| Estrutura Tarifária - Tarifa Residencial | | | |
| Categoria | Faixa | m ³ | Água R\$ |
| Residencial "B" | 1 | até 10 | 32,06/mês |
| | 2 | 11 a 25 | 5,8757/m ³ |
| | 3 | 26 a 50 | 8,2435/m ³ |
| | 4 | maior que 50 | 9,8784/m ³ |
| | 5 | Tarifa Sazonal | 12,3478/m ³ |
| Tarifa de Esgoto = 100% (cem por cento) da tarifa de água impresso | | | |

Fonte: CASAN (2015)

Portanto, a partir da Figura 38, será assumido que o gasto médio mensal, levando-se em consideração o padrão econômico e o tamanho das residências, será entre 26 e 50 m³. Ou seja, será cobrado R\$ 8,2435 (P) por m³ de água consumida.

Substituindo estes dados (Q e P) na Equação (9) temos a economia mensal (E):

$$E = 552 \times 8,2435 \therefore E \cong 4.550,00$$

Ou seja, pode-se economizar em todo o condomínio até R\$ 4.550,00 no gasto de água, mensalmente.

Porém, deve-se levar em conta que, como apresentado na Figura 38, a tarifa de esgoto é da ordem de 100% da tarifa de água. Ou seja, se não for consumida água da CASAN não será paga a taxa de esgoto. Sendo assim, a economia (E) é o dobro do apresentado, resultando em aproximadamente R\$ 9.100,00 mensais.

4.9.3 Custo do pavimento convencional

Acioli (2005) orçou hipoteticamente um pavimento de asfalto convencional, com sistema de drenagem convencional e sem reservatório de brita e obteve o custo de R\$ 75,60 por metro quadrado.

4.9.4 Custo do pavimento permeável

Moura (2004) indica como valor para estrutura em asfalto permeável sem infiltração na ordem de R\$ 96,92 o metro quadrado, sendo que os custos com manutenção são em média 5% deste valor.

Tominaga (2013) apresenta os valores obtidos por CWP (1998, apud Hilten e Lawrence, 2007) para a implantação dos pavimentos permeáveis como sendo entre R\$ 44,00 e R\$ 64,00, porém com o dólar cotado na época em R\$ 2,00. Nos valores de hoje (dólar cotado a R\$3,20) teríamos o valor para implantação dos pavimentos permeáveis entre R\$ 70,4 e R\$102,4 por metro quadrado.

Acioli (2005) implantou o pavimento asfáltico permeável em sua tese e orçando detalhadamente os custos para implantação deste pavimento asfáltico permeável ela obteve como custo por metro quadrado no valor de R\$ 99,53. Também foi gerada uma tabela (Tabela 16) que apresenta a influência da profundidade do reservatório de britas no acréscimo dos custos de implantação do Pavimento asfáltico permeável

Tabela 16 - Influência da profundidade de britas no acréscimo do custo dos pavimentos asfálticos permeáveis

| Profundidade | Asfalto poroso | Acréscimo no custo |
|--------------|----------------|--------------------|
| 5 | R\$ 73,63 | |
| 10 | R\$ 78,81 | 7,0% |
| 15 | R\$ 83,99 | 6,6% |
| 20 | R\$ 89,17 | 6,2% |
| 25 | R\$ 94,35 | 5,8% |
| 30 | R\$ 99,53 | 5,5% |
| 35 | R\$ 104,70 | 5,2% |
| 40 | R\$ 109,88 | 4,9% |
| 45 | R\$ 115,06 | 4,7% |
| 50 | R\$ 120,24 | 4,5% |

Fonte: Acioli (2005)

4.9.5 Estimativa de tempo de retorno do investimento

A partir do exposto nos itens 3.15.3 e 3.15.4, serão adotados como valores de implantação para os pavimentos asfálticos convencionais e permeáveis, respectivamente, R\$ 102,40 e R\$ 75,60. Vale ressaltar que os preços certamente sofreram reajuste, porém como está sendo analisada a diferença entre os valores, esse reajuste não é de tamanha importância.

Então, para saber em quanto tempo o sistema de pavimento permeável se tornará economicamente viável, primeiramente é necessário saber o quanto se gastará a mais na implantação deste pavimento em comparação ao convencional, ou seja a diferença de custo (Dc). Para tal, será utilizada a Equação 10:

$$Dc = 102,4 - 75,6 \therefore Dc = 26,8$$

Portanto, serão gastos R\$ 26,80 a mais por cada metro quadrado construído. Como são 4.000,00 metros quadrados construídos, haverá um incremento no valor total da obra na ordem de R\$ 107.200,00 se adotada a pavimentação permeável em detrimento da convencional.

Por fim, para determinar o tempo de retorno do investimento (Tr) deve-se dividir a diferença entre os custos de implantação do sistema permeável e o sistema tradicional (Dc) pela economia advinda da captação de água da chuva (E) (Equação 11):

$$Tr = \frac{107.200}{9.100} \cong 12$$

Portanto, dentro de um ano (12 meses), aproximadamente, haverá o retorno do investimento.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

5.1 Considerações Finais

A adoção de pavimentos permeáveis como função de controle de escoamento na fonte e captação de águas pluviais faz-se necessária tendo em vista o cenário mundial atual, onde há o constante e acelerado crescimento urbano. Tal iniciativa tende a gerar maior controle e planejamento na ocupação do solo, permitindo o desenvolvimento sustentável das cidades e minimizando os impactos decorrentes da urbanização.

Desta forma, o presente trabalho descreve o pavimento permeável como um todo, abrangendo os materiais possíveis de utilização nesta forma de pavimentação bem como os tipos de pavimentos permeáveis e suas respectivas funções em relação ao controle de escoamento na fonte, armazenamento das águas pluviais e liberação destas para o lençol freático além da descrição do passo-a-passo para o dimensionamento mecânico e hidráulico destes pavimentos. Com isso, foi basicamente criado um roteiro para os futuros trabalhos de interesse em programar o sistema de pavimentação permeável.

O pavimento permeável se integra de forma harmoniosa com o ambiente ao qual faz parte. Através deste trabalho foi possível perceber isso, além da facilidade em transformar uma água, que anteriormente caía sobre um pavimento convencional e escoava para a rede de drenagem urbana, em uma água que pode ser apanhada na torneira do jardim de uma residência.

Este trabalho mostrou o esboço de um sistema de captação de águas pluviais por meio de pavimentos permeáveis e redistribuição destas águas para uso doméstico. No entanto, o principal objetivo foi demonstrar a possibilidade e a viabilidade do sistema.

A execução dos drenos profundos para captar as águas pluviais e direcioná-las até um reservatório principal não é difícil do ponto de vista teórico e pode facilmente ser implantada juntamente com a pavimentação permeável. O mesmo vale para a redistribuição destas águas para as residências, que não passa de um sistema convencional de abastecimento de água. Portanto, mostrou-se que é possível e viável captar a água da chuva por meio dos pavimentos permeáveis e posteriormente utilizá-la para os mais variados fins.

Foi possível observar que o dimensionamento hidráulico, para os dados hidrológicos utilizados, não teve caráter decisivo na estrutura do pavimento, tendo em vista que as dimensões finais do pavimento (altura de cada camada) ao atender aos critérios de dimensionamento mecânico com segurança atendiam (com folga) os critérios de dimensionamento hidráulico, prevalecendo à estrutura mecânica, com diferença na granulometria das camadas de base e sub-base.

A análise de custos, detalhada em nível de anteprojeto, mostrou o quanto se pode gerar de volume armazenado de água, o que pode vir a ser um fator predominante quando da escolha de qual tipo de pavimento implantar (permeável ou impermeável). Esse volume armazenado não gera apenas economia do ponto de vista econômico, mas também do ponto de vista ecológico.

Espera-se que este trabalho sirva como embasamento teórico para futuros trabalhos relacionados a este tema, bem como sirva de inspiração para o uso de práticas sustentáveis. Como foi mostrado neste estudo, a implantação de pavimento permeável não requer equipamentos e técnicas sofisticadas, mas sim, uma pequena variação nas conhecidas técnicas de pavimentação convencional, como a adoção de agregados com granulometria uniforme e uso de ligantes modificados, por exemplo, a fim de tornar o pavimento permeável e poder contribuir para a conservação deste escasso recurso que é a água.

5.2 Recomendações para trabalhos futuros

No decorrer do trabalho foram assumidos vários fatores, não sendo realizados ensaios de laboratório ou pesquisas de campo. Portanto como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se:

- Realizar um estudo de campo completo, que engloba desde a análise de solo até a determinação do nível de lençol freático, o que pode acarretar na não viabilidade de implantação de pavimento permeável no local estudado;
- Analisar se na região de implantação do pavimento permeável existem os materiais necessários para a perfeita execução do mesmo, além de mão de obra especializada;
- Analisar as técnicas de manutenção dos pavimentos permeáveis utilizadas no Brasil bem como sua eficiência;
- Analisar a qualidade da água captada e determinar, a partir desta análise, quais os destinos que podem ser dados a esta água (lavagem de carros, irrigação de jardins

ou lavouras, lavagem de calçadas, etc.) ou então quais ações tomar para torna-la capaz de ser utilizada em sistemas internos às residências, como máquinas de lavar roupa e descarga de vasos sanitários, por exemplo;

- Realizar uma análise de custos baseada no real dimensionamento do pavimento permeável e considerar os custos com manutenção;
- Dimensionar o sistema de microdrenagem que atuará junto do pavimento permeável no sentido de captar as águas que não penetraram no pavimento, escoando pela superfície, bem como o dimensionamento do dreno perfurado que terá função de condução das águas pluviais captadas pelo pavimento permeável até o reservatório principal;
- Verificar a declividade mínima capaz de escoar por gravidade as águas pluviais captadas na camada reservatório do pavimento permeável até o reservatório principal;
- Analisar os custos de implantação deste sistema de microdrenagem, a drenagem profunda que direciona as águas captadas no pavimento para o reservatório principal, o sistema de tubulação para a transmissão das águas do reservatório para as residências, bem como o gasto com o reservatório em si, as caixas d'água secundárias para o armazenamento das águas pluviais advindas do pavimento necessárias em cada residência e gastos com bomba para distribuição, etc;
- Considerar como integrante ao sistema de captação de águas pluviais por meio do pavimento permeável um sistema de captação das águas pluviais também dos telhados das residências, de calçadas e jardins.

REFERÊNCIAS

ACIOLI, LAURA ALBUQUERQUE. **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte.** (2005).

AZZOUT Y., BARRAUD, S., CRES, F.N., ALFAKIH, E.; **Techniques Alternatives en Assainissement Pluvial**, Paris: Technique et Documentation 1994 – Lavoisier, 372 p.

BAPTISTA, M; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. **Técnicas compensatórias em drenagem urbana.** 1. ed. Porto Alegre: ABRH, 2005

CAMPOS, O. S., **Análise do Comportamento de Trecho Piloto de Revestimento Poroso com Asfalto Modificado por Polímero.** Tese de Doutorado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, (1998).

CEDERGREN, H.R., **Drenagem de Pavimentos de Rodovias e Aeródromos.** Rio de Janeiro, LTC, 1980.

PLINIO TOMAZ, **Curso de Manejo de águas pluviais** - Capítulo 60- Pavimento poroso Engenheiro Plinio Tomaz (pliniotomaz@uol.com.br) - 30/04/2009

DAYWATER. **Report 5.1 Review of the use of stormwater BMPs in Europe**, 18 de agosto de 2003.

DE ARAÚJO, Paulo Roberto; TUCCI, Carlos EM; GOLDENFUM, Joel A. **Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial** (2000).

DE CASTRO, Leonardo Mitre Alvim; BAPTISTA, Márcio Benedito; BARRAUD, Sylvie. **Proposição de metodologia para a avaliação dos efeitos da urbanização nos corpos de água** (2007).

Diniz, E. V. **Porous pavement – phase I – design and operational criteria.** Cincinnati, Ohio. U.S: Environmental Protection Agency, 1980.

EPA, 1999. **Storm Water Technology Fact Sheet, Porous Pavement.** EPA 832-F99-023 Office of Water, Washington, D. C.

FAURE, B., *et al.* **Techniques Nouvelles de Couches de Roulement – Lês Enrobés Drainants.** Bulletin de Liaison de Laboratoire dès Ponts et Chaussées, n.172

FONTES, Liseane Padilha Thives da Luz. **Optimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos..** Tese de Doutorado. Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Minho (2009).

GONÇALVEZ. **Relação intensidade – duração – frequência com base em estimativas de precipitação por satélite.** Porto Alegre (2011)

MARCHIONI, Mariana & SILVA, Cláudio Oliveira, Pavimento Permeável - **Melhores Práticas.** São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), 2011.

PELLIZZARI, Vinícius. **Avaliação da eficácia na restauração da capacidade de infiltração da camada superior de pavimentos porosos** (2013).

ROSSMAN, L.A. **Storm Water Management Model**, Version 5.0: User's Manual. U.S. Enviromental Protect Agency. Cincinnati, Ohio, 2010.

SCHUELER, T. R. **Controlling urban runoff:** a practical manual for planning and designing urban BMPs. Washington: Washington Metropolitan Water Resources Planning Board, 1987.

TOMINAGA, Erika Naomi de Souza. **Urbanização e cheias: medidas de controle na fonte.** Dissertação de mestrado, São Paulo, 2013.

URBONAS, B. R.; ROESNER, L. A. Hydrologic desing for urban drainage and flood control. In: MAIDMENT, D. R. **Handbook of hydrology.** New York: McGraw-Hill, 1992.

URBONAS, B.; STAHERE, P. **Stormwater:** best management practices and detention for water quality, drainage, and CSO management. Englewood Cliffs, New Jersey: PTR Prentice Hall, 1993.

VERDÉLIO, Andreia. **ONU: população precisará de 40% a mais de água em 2030**. Disponível em: <http://agenciabrasil.ebc.com.br/>. Acesso em: 20 nov. 2014.

VIRGILIIS, A.L.C. **Procedimentos de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009

WATANABE, S.; **Study on storm water control by permeable pavement and infiltration pipes**. Water Science and Technology. (1995)

ANEXOS

Projeto de lei nº 12 de 2012

- Local: Diário Oficial Poder Legislativo, Estado de São Paulo Palácio Nove de Julho, Av. Pedro Álvares Cabral, 201, Ibirapuera - CEP: 04097-900, Fone: (011) 3886-6122. Diário da Assembléia Legislativa – Nº 24 – DOE de 07/02/12 – p.19
- O Projeto: Torna obrigatória a adoção de pavimentação ecológica nas áreas que menciona, e dá outras providências.

A Assembleia Legislativa do Estado de São Paulo Decreta:

Artigo 1º - Fica obrigatória a adoção de pavimentação ecológica quando da pavimentação de terrenos naturais para implantação de:

- I – vias internas de condomínios públicos ou privados;
- II - passeios de logradouros públicos;
- III – áreas pavimentadas de praças e quarteirões fechados;
- IV – áreas abertas destinadas a estacionamento de veículos;
- V – ciclovias;
- VI – vias públicas de trânsito local em novos loteamentos residenciais;
- VII – áreas pavimentadas descobertas em imóvel de uso residencial, comercial e industrial.

§ 1º – A adoção do pavimento ecológico será dispensada em parte da área a ser pavimentada, ou em seu todo, nos casos em que se comprove, por meio de laudo técnico, que o uso desse pavimento é incompatível com as condições podológicas e/ou topográficas do local, que o uso desse tipo de pavimento é incompatível com as atividades previstas para o local ou prejudicial à garantia de plena acessibilidade.

§ 2º – São consideradas vias públicas de trânsito local as vias essencialmente residenciais que apresentam como principal função o acesso aos lotes e se caracteriza por prever o atendimento de tráfego de veículos leves.

Artigo 2º - Para fins desta Lei, entende-se como pavimentação ecológica todo tipo de piso permeável ou semipermeável que permita o escoamento de água e a recarga de aquífero.

§ 1º – A pavimentação ecológica deverá ser executada utilizando a melhor tecnologia existente de acordo com o tipo de uso da área e poderá ser executada em:

I - blocos de concreto do tipo intertravado rejuntados com materiais permeáveis;

II - blocos vazados preenchidos com grama;

III - asfalto poroso; e

IV - concreto poroso que permita a passagem da água em razão de alto índice de vazios interligados existentes.

§ 2º – O terreno a ser pavimentado será previamente preparado com vistas a garantir a capacidade de infiltração das águas pluviais.

§ 3º – Após a aprovação do projeto, por parte do órgão competente, é vedada qualquer impermeabilização adicional de superfície.

Artigo 3º - Caberá ao Grupo de Análise e Aprovação de Projetos Habitacionais do Estado de São Paulo (Graprohab), da Secretaria Estadual da Habitação, analisar, deliberar e fornecer as diretrizes, para o atendimento do que dispõe esta lei, nos casos de projetos de parcelamento do solo e núcleos habitacionais urbanos a serem implantados que se enquadrem em pelo menos uma das seguintes especificações:

I – projetos de loteamentos para fins habitacionais;

II – projetos de conjuntos habitacionais com abertura ou prolongamento de vias públicas existentes;

III - projetos de desmembramentos para fins habitacionais que resultem em mais de 10 (dez) lotes não servidos por redes de água e de coleta de esgotos, guias e sarjetas, energia e iluminação pública;

IV - projetos de condomínios residenciais que se enquadrem em uma das seguintes situações:

a. condomínios horizontais e mistos (horizontais e verticais), com mais de 200 (duzentas) unidades ou com área de terreno superior a 50.000,00m² (cinquenta mil metros quadrados);

b. condomínios verticais, com mais de 200 (duzentas) unidades ou com área de terreno superior a 50.000,00m² (cinquenta mil metros quadrados), que não sejam servidos por redes de água e de coleta de esgotos, guias e sarjetas, energia e iluminação pública;

c. condomínios horizontais, verticais ou mistos (horizontais e verticais) localizados em área especialmente protegidas pela legislação ambiental com área de terreno igual ou superior a 10.000,00m² (dez mil metros quadrados).

Parágrafo único – Os projetos não enquadrados nas hipóteses previstas neste artigo deverão, do mesmo modo, atender às disposições

da legislação vigente, facultando-se ao interessado requerer a apreciação e aprovação por parte do Graprohab.

Artigo 4º - O Poder Executivo promoverá campanha de incentivo ao uso do pavimento ecológico.

Artigo 5º - O Poder Executivo regulamentará esta lei no prazo de 180 (cento e oitenta) dias, a contar da data de sua publicação.

Artigo 6º - As despesas decorrentes da execução desta lei correrão por conta das dotações orçamentárias próprias.

Artigo 7º - Esta lei entra em vigor na data de sua publicação.

JUSTIFICATIVA

Um dos principais impactos que o desenvolvimento de uma área urbana provoca nos processos hidrológicos está ligado ao aumento das superfícies impermeáveis.

A grande quantidade de concreto e asfalto presente nas grandes cidades se tornou um sério problema para os moradores e também para o meio ambiente. Com tanto terreno impermeável, a água das chuvas não consegue penetrar no solo, abastecer os lençóis freáticos e ainda causam enchentes e alagamentos.

A ocupação urbana através de áreas impermeáveis como telhados, passeios, ruas, estacionamentos e outros altera as características de volume e qualidade da água.

Diante da questão das cheias, os tradicionais conceitos sanitaristas de construção de obras que objetivam se livrarem da água o mais rápido possível (como calhas, sarjetas, bocas de lobo e retificação da calha do rio) somente transferem o problema da cheia à jusante, pois aceleram o escoamento das águas. Além disto, tais intervenções envolvem custos elevados, além de problemas ambientais (devido aos resíduos sólidos) e a interligação de condutos pluviais com os sistemas de esgoto, comumente feito no Brasil. Por conta deste sistema largamente utilizado, o gasto de dinheiro ocorre duas vezes. Primeiro quando são desenvolvidos os projetos inadequados de drenagem urbana; e segundo, quando é necessário investir mais dinheiro para recuperar áreas inundadas devido aos maus projetos.

A utilização dos pavimentos permeáveis em áreas urbanas visa reduzir a vazão drenada superficialmente, melhorar a qualidade da água e contribuir para o aumento da recarga de água subterrânea.

No que tange as questões de constitucionalidade da proposição, de ser gizado que a matéria é de natureza legislativa, podendo o Estado-membro, no exercício da competência concorrente que lhe confere o artigo 24, inciso VI, da Constituição Federal, legislar sobre florestas, caça, pesca, fauna, conservação da natureza, defesa do

solo e dos recursos naturais, proteção do meio ambiente e controle da poluição.

Também devemos ressaltar que o projeto de lei atende o disposto no artigo 25 da Constituição Estadual, razão pela qual não vemos óbices a sua aprovação quanto aos aspectos orçamentários e financeiros.